



Πολυτεχνείο  
Κρήτης

Πολυτεχνείο Κρήτης

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Διπλωματική Εργασία

Συγκριτική Μελέτη Σκοπιμότητας  
Εγκατάστασης Ανεμογεννήτριας στο  
Πολυτεχνείο Κρήτης

Καλαϊτζάκης Μανώλης

AM:2008010027

---

Επιβλέπων καθηγητής: Παπαευθυμίου Σπύρος

# Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	3
Εισαγωγή	3
1.1 Ανανεώσιμες Πηγες Ενέργειας	3
1.1.1 Σύντομη Ιστορία	3
1.1.2 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα Α.Π.Ε.	4
1.1.3 Αιολική Ενέργεια	6
1.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο	10
1.2.1 Γενικά γνωρίσματα του ανέμου	10
1.2.2 Το αιολικό δυναμικό	14
1.3 Ανεμογεννήτριες	16
1.3.1 Τύποι και χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών	17
1.3.2 Η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας	18
1.3.4 Τα μέρη μιας ανεμογεννήτριας	20
1.4 Κόστη κατασκευής και συντήρησης	23
1.4.1 Χαρακτηριστικά στοιχεία κόστους	23
1.5 Οι μέθοδοι συντήρησης	28
Κεφάλαιο 2	31
2.1 Επιλογής της ανεμογεννήτριας	31
2.1.1 Ο αλγόριθμος της επιλογής	31
2.1.2 Τα αποτελέσματα	39
2.2 Χρηματοοικονομική μελέτη	44
2.2.1 Η εφαρμογή Retscreen	44
2.2.2: Ανάλυση χρηματοοικονομικών στοιχείων	44
2.2.3: Ανάλυση Κινδύνου	46
Σχολιασμός αποτελεσμάτων και συμπεράσματα	50
Παράρτημα: Λίστα ανεμογεννητριών	51
Βιβλιογραφία	52

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι να επιλεγεί, από μια λίστα ανεμογεννητριών, η πλέον κατάλληλη για την θεωρητική κατασκευή της για την περιοχή του Πολυτεχνείου. Η λίστα αυτή θα εμπεριέχει ανεμογεννήτριες οριζόντιου καθώς και κάθετου άξονα από το 2019. Έως την ολοκλήρωση αυτού του σκοπού θα αναφερθεί μία σύντομη ιστορία της αιολικής ενέργειας και των ανεμογεννητριών, της Ελλάδας και της Κρήτης υπό την οπτική της πράσινης ενέργειας, θα εξερευνηθούν οι διαφορές και τα πλεονεκτήματα των ανεμογεννητριών διαφορετικού άξονα, θα αναλυθεί η θεωρία πίσω από την τελική επιλογή και θα ολοκληρωθεί, η εργασία, με την μελέτη του κόστους κατασκευής και συντήρησης του έργου.

## 1.1 Ανανεώσιμες Πηγες Ενέργειας

### 1.1.1 Σύντομη Ιστορία

Κατά την ιστορία του ανθρώπινου πολιτισμού μορφές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλές και διάφορες μορφές. Από την χρήση βιομάζας σαν το ξύλο, την χρήση ζώων έως και την κατασκευή των Ανεμόμυλων, η ιστορία κατακλύζεται με παραδείγματα. Οι πρώτες μορφές ανεμόμυλων εμφανίστηκαν στην Αίγυπτο κατά το 1000πχ με τις πρώτες έγκυρες πληροφορίες για αυτούς το 644πχ, οι Κινέζοι χρησιμοποιούσαν κάθετους ανεμόμυλους για την αποστράγγιση των χωραφιών ρυζιού που είχαν και στην Ευρώπη τα πρώτα σημάδια τους εμφανίστηκαν τον 10<sup>ο</sup> αιώνα.

Στην σύγχρονη εποχή, με την βιομηχανική επανάσταση και την ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού την τελευταία εκατονταετία, επήλθαν δυσάρεστες συνέπειες. Αύξηση της στάθμης των θαλασσών, εμφάνιση δυσμενέστερων και αραιότερων καιρικών συνθηκών είναι όλα συμπτώματα του φαινομένου του θερμοκηπίου, παραγώγου της συνεχής υπερεκμεταλλεύσως του πετρελαίου και άλλων γνωστών, ορυκτών καυσίμων. Απόρροια των γεγονότων αυτών, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση εξαιτίας της ραγδαίας αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού και σε συνάρτηση με τη μείωση των αποθεμάτων των καυσίμων, ήταν η στροφή και επακολουθόμενη ανάπτυξη των εναλλακτικών μορφών ενέργειας. Πλέον περνιέται και στην κοινή συνείδησή μας, ότι η

χρήση αυτών των ανεξάντλητων και φυσικών μορφών ενέργειας προσφέρει μόνο πλεονεκτήματα, σε εμάς σαν ανθρώπινο γένος, αλλά και στον πλανήτη μας. Η ποικιλία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δεν περιορίζεται όμως μόνο στην αιολική και την ηλιακή ενέργεια, ο άνθρωπος έχει καταφέρει να δαμάσει την γεωθερμική, την κυματική, την υδατόπτωση ακόμα και την χημική ενέργεια του υδρογόνου.

Αν και, ιδιαιτέρως, ακριβές, κατά το ξεκίνημα, οι ΑΠΕ εμφάνισαν μία αύξηση ενδιαφέροντος με την πετρελαϊκή κρίση του 1973 και του 1979 και ενισχύθηκαν σαν τομέας τα τελευταία 30 χρόνια, με την συνειδητοποίηση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών προβλημάτων, που δημιουργούν οι συμβατικές πηγές ενέργειας και με την δέσμευση του ανεπτυγμένου κόσμου για την μείωση των ρύπων και την αύξηση της χρησιμοποίηση των. Το κόστος των εφαρμογών ήπιων μορφών ενέργειας, συνεχώς πέφτει, με αποτέλεσμα, ειδικά η αιολική και η υδροηλεκτρική ενέργεια, αλλά και η βιομάζα, μπορούν πλέον να αγωνίζονται παραδοσιακές πηγές ενέργειας όπως ο άνθρακας και η πυρηνική ενέργεια.

Στην Ευρώπη το ποσοστό της ενέργειας που προέρχεται από ΑΠΕ ανέρχεται στο 17% με στόχο το 20% έως το τέλος του 2020 και τουλάχιστον το 27% έως το 2030 [1]. Από την αναφορά του Ιουλίου 2020, στην Ελλάδα το 34% της ενέργειας προέρχεται από ΑΠΕ σε εκτιμώμενο σύνολο 1.358 GWh [2]. Τέλος, στην Κρήτη, οι ΑΠΕ καλύπτουν το 28% των ενεργειακών αναγκών του νησιού με 194MW να προέχονται από ανεμογεννήτριες [3], 95,5MW από φωτοβολταϊκά πάρκα και ιδιόκτητες εγκαταστάσεις [4], 0,3MW από ένα υδροηλεκτρικό εργοστάσιο και 0,5MW από ένα εργοστάσιο Βιομάζας.

### **1.1.2 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα Α.Π.Ε.**

Οι ΑΠΕ είναι μορφές ενέργειας που προέρχονται από μία ποικιλία φυσικών διαδικασιών όπως είναι ο άνεμος, το νερό ή η γεωθερμία και η εκμετάλλευσή τους είναι ουσιαστικά η άντληση της ενέργειας από την φυσική ροή των διαδικασιών αυτών. Πρόκειται για "καθαρές" μορφές ενέργειας, πολύ φιλικές στο περιβάλλον, που δεν αποδεδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα όπως οι άλλες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούμε.

### *Τα πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας:*

Τα οφέλη της χρήσεως των ΑΠΕ δεν περιορίζονται σε περιβαλλοντικές μόνο αλλαγές αλλά και θετικές κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις στην περιφερειακή και τοπική ανάπτυξη των περιοχών.

- Είναι ανεξάντλητες πηγές ενέργειας που συμβάλλουν στην ελάττωση της εξάρτησής μας στους συμβατικούς πόρους των οποίων τα αποθέματα σταδιακά μειώνονται παγκοσμίως.
- Είναι φιλικές στο περιβάλλον και συμβαδίζουν με την κοινωνική μας συνείδηση.
- Ενισχύουν την ενεργειακή αυτάρκεια και ασφάλεια σε τοπικό, περιφερειακό και εθνικό επίπεδο.
- Είναι γεωγραφικά διεσπαρμένες και αποκεντρώνουν το ενεργειακό σύστημα μειώνοντας τις ενεργειακές απώλειες που προέρχονται από την συγκέντρωση των ενεργειακών πηγών.
- Έχουν χαμηλό λειτουργικό κόστος που δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις τις διεθνούς οικονομίας.
- Η εγκατάστασή τους είναι σχετικά απλή και σύντομη διαδικασία, πράγμα που διευκολύνει την κάλυψη τις ενεργειακής ζήτησης.
- Οι υποβαθμισμένες περιοχές συχνά αναζωογονούνται με τις επενδύσεις σε ΑΠΕ από την δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και την προώθηση επενδύσεων.
- Η εκμετάλλευση κάποιων μορφών ΑΠΕ μπορεί να γίνει με την κατασκευή των από μικρής έκτασης βιοτεχνίες.
- Η λειτουργία των ΑΠΕ είναι κατά κόρον ακίνδυνη.
- Δεν παρουσιάζονται συνήθως ιδιαίτερα τεχνολογικά προβλήματα.
- Επιδοτούνται από τις περισσότερες κυβερνήσεις.
- Είναι η αποδοτικότερη μορφή ενέργειας διότι εξαλείφουν την ανάγκη καύσης, μετακίνησης και αποθήκευσης πόρων για την παραγωγή της.
- Υλοποιείται είτε με άμεσα μέσα είτε με κάποιες ανακατασκευές και σχετικές μελέτες.

- Θα γίνει υποχρεωτική με τον Κανονισμό Ενεργειακής Αποδοτικότητας Κτηρίων (KENAK)

#### *Τα Μειονεκτήματα των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας:*

- Έχουν μικρό συντελεστή απόδοσης και ανάγκη για μεγάλη συγκριτικά έκταση γης.
- Δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν εύκολα για την κάλυψη αναγκών μεγάλων αστικών κέντρων.
- Η διάσπασή τους δυσκολεύει την συγκέντρωση μεγάλων μεγεθών ισχύος καθώς και την αποθήκευσή τους.
- Η στοχαστική πλευρά των μεγεθών τους, όπως ο άνεμος και η ηλιακή ακτινοβολία έχουν σαν αποτέλεσμα την διακύμανση της παραγόμενης ισχύος απαιτώντας την εφεδρεία άλλων ενεργειακών πηγών ή δαπανηρών τρόπων αποθήκευσης.
- Το κόστος επένδυσης ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος σε σύγκριση με τις σημερινές τιμές συμβατικών καυσίμων είναι ακόμα υψηλό.
- 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)
- Για τα υδροηλεκτρικά έργα λέγεται ότι προκαλούν έκλυση μεθανίου από την αποσύνθεση των φυτών που βρίσκονται κάτω απ' το νερό κι έτσι συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

#### **1.1.3 Αιολική Ενέργεια**

Η αιολική ενέργεια είναι ουσιαστική η διαδικασία της κλοπής της κινητικής ενέργειας του ανέμου, ανήκει στις ήπιες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας, εφόσον δεν ρυπαίνει το περιβάλλον και είναι θεωρητικά ανεξάντλητη. Δημιουργείται, έμμεσα, από την ηλιακή ακτινοβολία λόγω της ανομοιόμορφης θέρμανσης του πλανήτη που προκαλεί μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από περιοχή σε περιοχή. Υπολογίζεται ότι το 2% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια των αερίων μαζών εκ των οποίων το 35% διαχέεται σε απόσταση 1 χλμ. από την επιφάνεια

της γης. Υπολογίζεται ότι, με συντηρητικές εκτιμήσεις, στο 13% της επιφάνειας της γης επικρατούν άνεμοι μέσης ετήσιας ταχύτητας πάνω από 6,9 m/sec σε ύψος 80μ [5] με την αντίστοιχη τιμή στα 10μ να είναι 5,5 m/sec. Όταν η μέση τιμή του ανέμου είναι μεγαλύτερη από αυτή την τιμή, τότε το αιολικό δυναμικό της περιοχής θεωρείται εκμεταλλεύσιμο και οι απαιτούμενες εγκαταστάσεις μπορούν να θεωρηθούν οικονομικά βιώσιμες με βάση τα σημερινά δεδομένα. Το κόστος κατασκευής των ανεμογεννητριών έχει μειωθεί σημαντικά και μπορεί να θεωρηθεί ότι η αιολική ενέργεια διανύει την πρώτη περίοδο ωριμότητας, καθώς είναι πλέον ανταγωνιστική των συμβατικών μορφών ενέργειας.

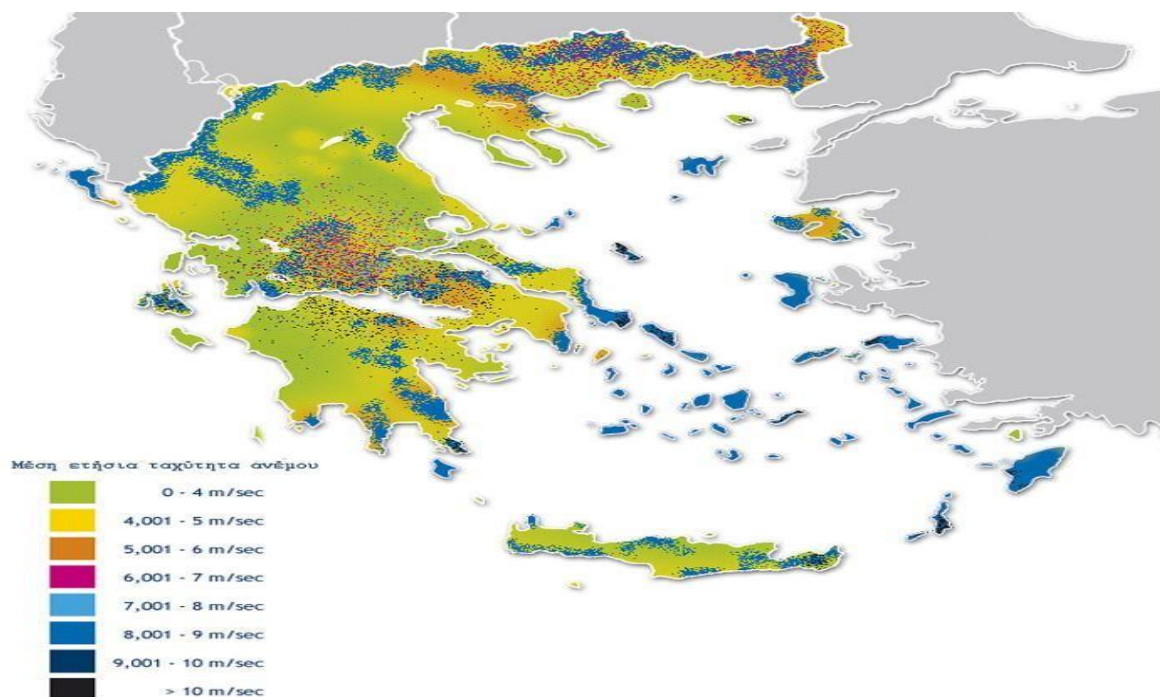
### *Αιολικά πάρκα στην Ελλάδα*

Το αιολικό δυναμικό της Ελλάδας είναι εξαιρετικά πλούσιο, με αποτέλεσμα η αιολική ενέργεια να έχει την δυνατότητα να γίνει δυνατός μοχλός ανάπτυξής της. Το πρώτο αιολικό πάρκο εγκαταστάθηκε το 1982 στην Κύθνο, με τις πρώτες μετρήσεις αιολικού δυναμικού να ξεκινούν το 1975, από την ΔΕΗ. Μέχρι σήμερα έχουν κατασκευαστεί πάρκα στην Άνδρο, την Εύβοια, την Λήμνο, την Λέσβο, την Χίο, την Σάμο και στην Κρήτη με συνολική ισχύ πάνω από 30MW.

Βέβαια, ο ιδιωτικός τομέας έχει δείξει και αυτός μεγάλο ενδιαφέρον στην εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, ιδιαίτερα στην Κρήτη, όπου το Υπουργείο Ανάπτυξης έχει παραχωρήσει άδειες εγκατάστασης για αιολικά πάρκα ισχύος πολλών MW.

Λόγω της κατακερμάτισης της εδαφικής μας από μικρά και μεγάλα μεγέθους νησιά, η διασύνδεσή τους στο δίκτυο ηλεκτροδότησης είναι μια δύσκολη υπόθεση. Η χρήση τοπικών κέντρων παραγωγής ενέργειας και ειδικότερα ανανεώσιμων πηγών όπως η αιολική ενέργεια μοιάζει η πιο συμφέρουσα και κατάλληλη λύση, δεδομένης της επαρκούς, βέβαια, έκτασης για την άνετη τοποθέτησής τους. Ο άνεμος και ο ήλιος δεν είναι, όμως, σταθερές πηγές ενέργειας με αποτέλεσμα να υπάρχει απόκλιση στις αποδόσεις των ΑΠΕ. Για αυτό τον λόγο, είναι απαραίτητη συχνά, λόγω του κόστους αποθήκευσης της ενέργειας, η συνοδεία των αιολικών ή φωτοβολταϊκών πάρκων με κλασσικές μονάδες παραγωγής ενέργειας.

Στα νησιά του Αιγαίου, στην Κρήτη και στην Ανατολική Στερεά Ελλάδα, οι μέσες ταχύτητες ανέμου είναι 6-7 m/sec, με αποτέλεσμα να παρατηρείται ανάπτυξη έργων εκμετάλλευσης του αιολικού δυναμικού, αφού το κόστος της παραγόμενης ενέργειας με χρήση ανεμογεννητριών είναι ικανοποιητικά χαμηλό.



Εικόνα 1: Χάρτης μέσων τιμών ταχύτητας ανέμων στον ελλαδικό χώρο [6].

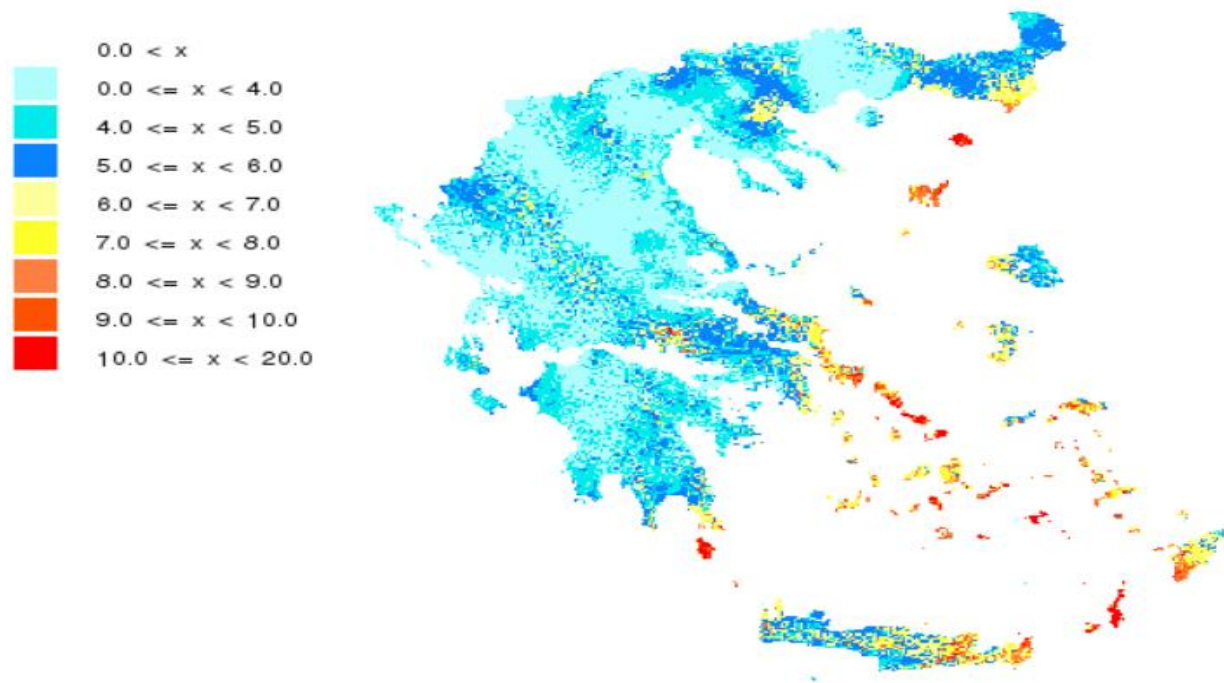
Νησί	Ταχύτητα ανέμου (m/sec)
Άνδρος	9,7
Τήνος	9,5
Μύκονος	10,8
Σύρος	8,1
Κρήτη	8,1
Λήμνος	8,1
Λέσβος	8,7
Χίος	8,1
Σάμος	10,4
Εύβοια	9,2
Κάρπαθος	9,6
Σκύρος	6,5
Σαμοθράκη	6,6

Πίνακας 1: Ταχύτητες ανέμων στα νησιά

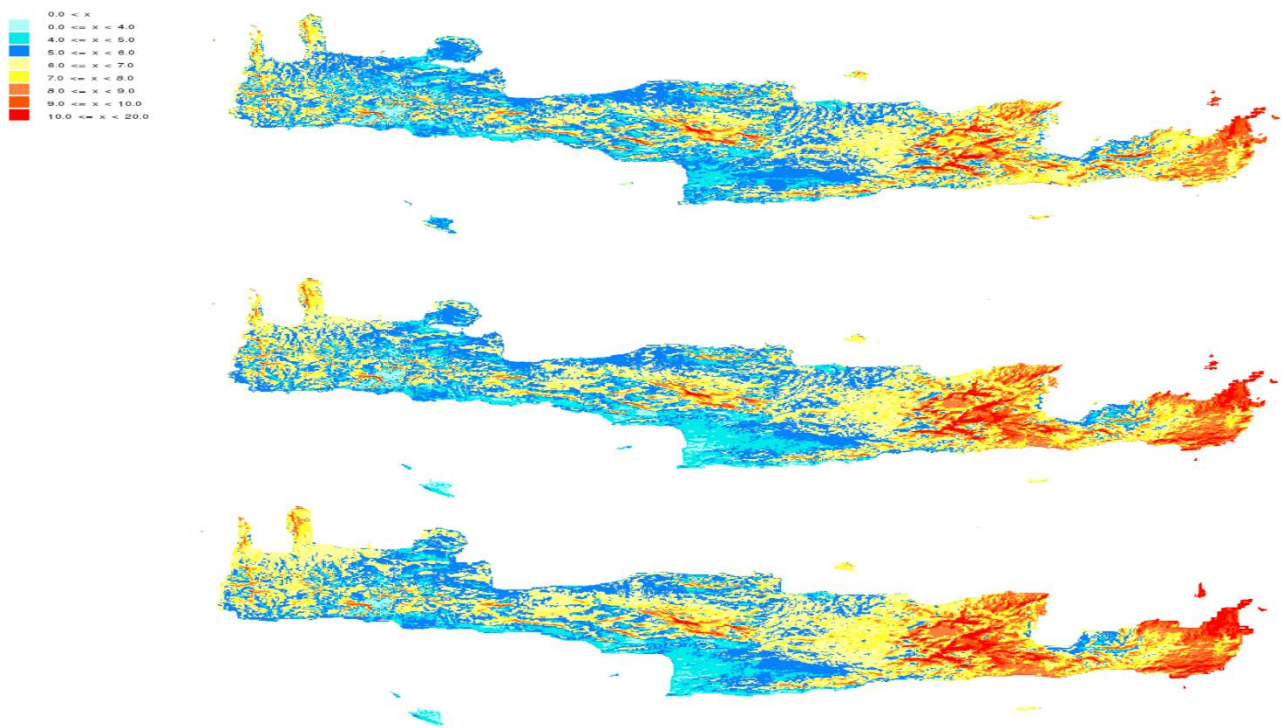


Το αιολικό δυναμικό της Ελλάδας είναι ικανό να καλύψει αρκετό ποσοστό των ηλεκτρικών αναγκών της χώρας. Περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό, όπως η Κρήτη ή η Εύβοια, έχουν ήδη κατασκευάσει αιολικά πάρκα. Συγκεκριμένα, στην Κρήτη, ξεκίνησε η αξιοποίηση της δύναμης του ανέμου, από το 1993 από την ΔΕΗ, με την κατασκευή ενός αιολικού πάρκου στο Τοπλού της Σητείας.

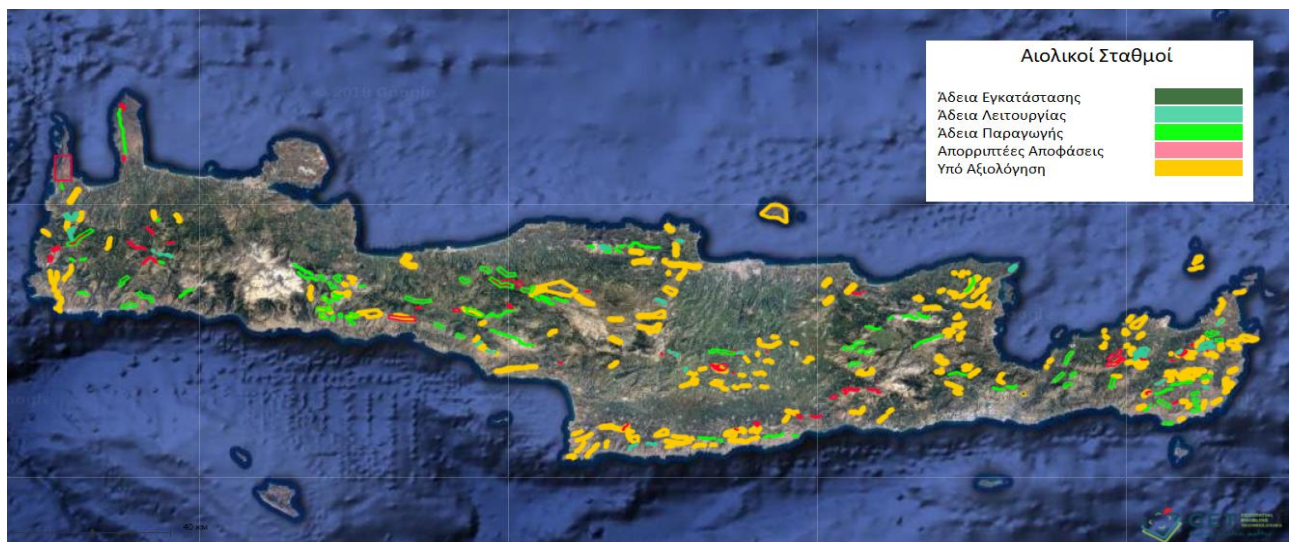
Παρακάτω, θα δείτε κάποιους χάρτες με στοιχεία του αιολικού δυναμικού της Ελλάδας και της Κρήτης, , καθώς και την κατάσταση των αδειών παραγωγής από την Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας.



Εικόνα 2: Αιολικό δυναμικό Ελλάδος υψομέτρου 80μ [7].



Εικόνα 3: Αιολικό δυναμικό Κρήτης υψομέτρου 80μ, 100μ και 120μ [7].



Εικόνα 4: Χάρτης κατάστασης αδειών από την Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας.

## 1.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

### 1.2.1 Γενικά γνωρίσματα του ανέμου

Η κίνηση, κυρίως οριζοντίως, μεγάλων μαζών ατμοσφαιρικού αέρα είναι ο επονομαζόμενος άνεμος. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του είναι η διεύθυνση και η ταχύτητά ή αλλιώς έντασή του. Οι πιο σημαντικοί παράγοντες η δημιουργίας και διαμόρφωσής του είναι οι εξής:

- Η περιστροφική κίνηση της Γης γύρω από τον άξονά της.
- Η διαφορετική πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας και θέρμανση της επιφάνειας της γης από περιοχή σε περιοχή.
- Η ανομοιομορφία του ανάγλυφου της γης

Όλοι αυτοί οι παράγοντες έχουν ως αποτέλεσμα, η ατμοσφαιρική πίεση να μεταβάλλεται, είτε σε μικρό είτε σε μεγάλο βαθμό, μεταξύ γειτονικών περιοχών και έτσι, να εξαναγκάζει της αέριες μάζες σε κίνηση. Οι δυνάμεις στις οποίες οφείλεται ο άνεμος είναι οι εξής:

- Η δύναμη της βαροβαθμίδας είναι αυτή, η οποία τείνει να μετακινήσει της αέριες μάζες μεταξύ γειτονικών περιοχών λόγω της διαφοράς των ατμοσφαιρικών πιέσεων, από την περιοχή της υψηλής πίεσεως προς την περιοχή της χαμηλότερης.
- Η δύναμη Coriolis είναι η οριζόντια εκτροπτική δύναμη η οποία δημιουργείται από την ελεύθερη κίνηση του αέρα σε σχέση με την επιφάνεια της Γης. Η φορά αυτής της δύναμης τείνει να εκτρέψει τον άνεμο στο βόρειο ημισφαίριο προς τα αριστερά ενώ αντίστοιχα στο νότιο, προς τα δεξιά.
- Η φυγόκεντρη δύναμη επενεργεί πάνω στα μόρια του αέρα τα οποία προσπαθούν να ακολουθήσουν την κυκλική κίνηση της Γης.
- Η δύναμη της τριβής εμφανίζεται αντίθετα στην κίνηση του ανέμου όταν αυτός έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια της Γης και εξαρτάται από την ταχύτητα της περιστροφής του εδάφους και του ανέμου. Η δύναμη της τριβής αναπτύσσεται επίσης και μεταξύ των γειτονικών στρωμάτων του αέρα.

### *Μονάδες μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου*

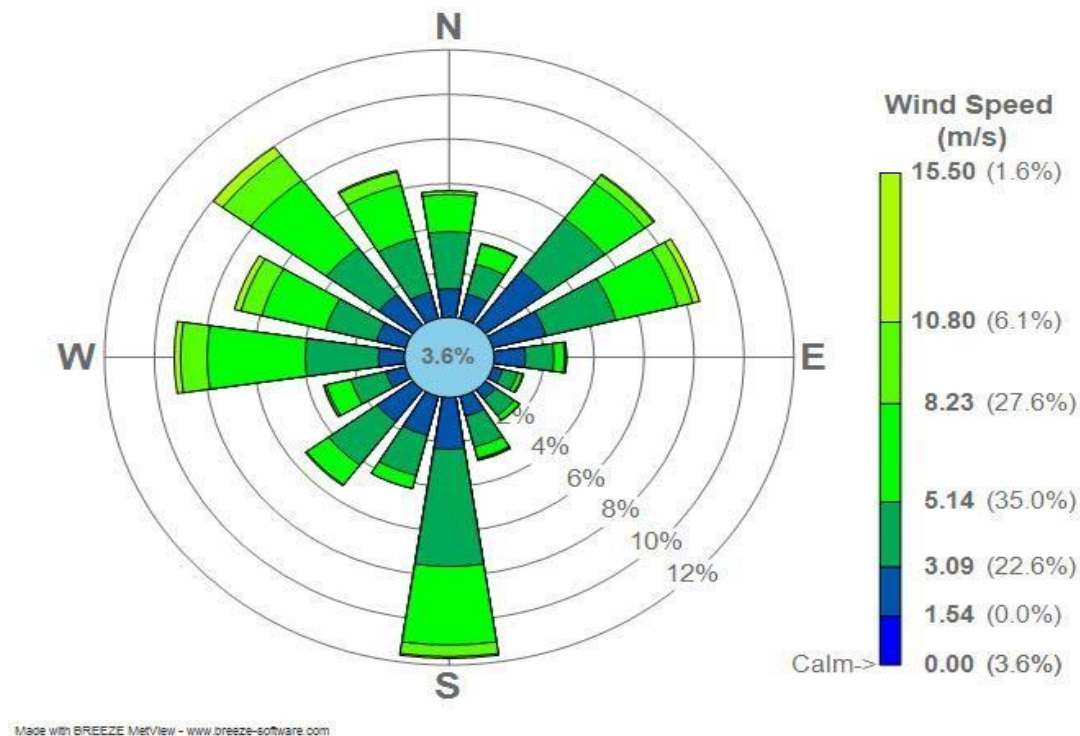
Η ταχύτητα του ανέμου, που προσδιορίζεται ως την μετακίνηση μιας αέριας μάζας ανά την μονάδα χρόνου, δεν είναι κάτι που μπορούμε να μετρήσουμε εύκολα. Η συνηθισμένη πρακτική είναι η παρατήρηση της ταχύτητας που δίνει ο άνεμος σε άλλα σώματα, όπως ο καπνός ή τα σύννεφα. Οι μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιούνται είναι οι παρακάτω:

- m/sec: μέτρα ανά δευτερόλεπτο
- km/h: χιλιόμετρα ανά ώρα

- mph: μίλια (1.609μ.) ανά ώρα
- ft/sec: Πόδια (0,304μ.) ανά δευτερόλεπτα
- knots: κόμβοι (1.852 μέτρα ανά ώρα)

### Η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου

Η μέτρηση των χαρακτηριστικών του ανέμου είναι ένα καθημερινό και τακτικό φαινόμενο που γίνεται από τους μετεωρολογικούς σταθμούς που γίνεται με πολλά και διαφορετικά όργανα μέτρησης. Ένας από τους κύριους τρόπους απεικόνισής του ανέμου μιας περιοχής είναι το ροδόγραμμα. Είναι ένα εποπτικό διάγραμμα από το οποίο φαίνεται άμεσα την διάρκεια και την μέση τιμή του ανέμου για τις διάφορες κατευθύνσεις του.



Εικόνα 5: Απεικόνιση ροδογράμματος ταχύτητας ανέμου [8].

Οι μετεωρολογικές μετρήσεις μας δείχνουν την μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου να είναι ανάλογη με την απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους. Μέχρι κάποια ύψη, οι παρακάτω εκφράσεις μας δείχνουν μια σχετικά κοντινή εκτίμηση της αλλαγής της ταχύτητας του ίδιου ρεύματος ανέμου με την αλλαγή του υψομέτρου του.

- Εκθετικός νόμος:  $\frac{u_1}{u_2} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^n$  (3.1)

- Λογαριθμικός νόμος:  $\frac{u_1}{u_2} = \frac{1}{0,35} * \ln\left(\frac{h}{z_0}\right)$  (3.2)

Όπου U, U1 και U2 είναι οι οριζόντιες συνιστώσες ταχύτητας στα ύψη h, h1 και h2 αντίστοιχα, Uτ είναι η ταχύτητα τριβής, z0 η τραχύτητα της επιφάνειας του εδάφους και n ο δείκτης του εκθετικού νόμου. Οι τιμές του z0 και του n εξαρτώνται από το είδος της επιφάνειας εδάφους και μας δίδονται στον παρακάτω πίνακα ο οποίος δημιουργήθηκε από τους Warne και Calnan.

Είδος εδάφους	z <sub>0</sub>	n
Λείο (θάλασσα, άμμος, χιόνι)	0,001-0,02	0,10 - 0,13
Ελαφρώς τραχύ( Χαμηλό χορτάρι και καλλιέργειες, αγροτικές περιοχές)	0,02-0,3	0,13 - 0,20
Τραχύ( δάση, προάστια)	0,3-2	0,20 - 0,27
Πολύ τραχύ( Αστικές περιοχές, ψηλά κτήρια)	2-10	0,27 - 0,40

Η ταχύτητα, εκτός από την απόσταση, του εδάφους, επηρεάζει την τελική κατανομή της αιολικής ταχύτητας έως ένα ύψος μετάβασης h<sub>cr</sub> = 0,08x, κατά τον Marrulaz, όπου x, η απόσταση από το θεωρούμενο σημείο όπου μεταβάλλεται η τραχύτητα του εδάφους. Αν x>5km η επίδραση της μεταβολής της ταχύτητας του εδάφους είναι πρακτικά αμελητέα. Αν x<5km και h<h<sub>cr</sub>, η τραχύτητα του εδάφους επιδρά στην ταχύτητα του ανέμου στην διεύθυνση άνω και κάτω της πνοής του ανέμου.

Φυσικά εμπόδια όπως λοφοσειρές ή απότομοι βράχοι έχουν την δυνατότητα να μεταβάλλουν σημαντικά την ανάπτυξη και την εξέλιξη της αιολικής ταχύτητας. Η αύξηση του ταχύτητας του ανέμου στην κορυφή μιας λοφοσειράς μπορεί να κυμανθεί από 40% έως και 80%, αλλά ακόμα και στην περίπτωση ενός λόφου η διακύμανση μπορεί να φτάσει από το 20% έως και το 40%.

Η απρόβλεπτη φύση του ανέμου επιβεβαιώνεται σε καθημερινή βάση και ως αποτέλεσμα έχουν εφευρεθεί πολλά και ποικίλα όργανα μέτρησής του, τα οποία κατατάσσονται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες με βάση τις αρχές της λειτουργίας του καθενός:

- Ανεμόμετρα περιστροφικού τύπου
- Ανεμόμετρα πίεσης
- Ανεμόμετρα θερμού σύρματος
- Ακουστικά ανεμόμετρα Doppler



### *Η διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου και η ατμοσφαιρική τυρβή.*

Η ενέργεια του ανέμου, όπως έχουμε αναλύσει, έχει πολλές μεταβλητές που την επηρεάζουν, εξαιτίας του πλήθους αυτών των μεταβλητών εμφανίζει μεγάλες διακυμάνσεις. Οι διακυμάνσεις αυτές γίνονται πιο έντονες κατά την διάρκεια της μέρας όπου και η θερμοκρασία μεταξύ θάλασσας και ξηράς είναι μεγαλύτερη.

Ο άνεμος παρουσιάζει μεγάλη συχνότητα τυρβής με απρόβλεπτες και τυχαίες διαταραχές, για αυτό τον λόγο για την πρόβλεψή του βασιζόμαστε σε στατιστικές τεχνικές που στηρίζονται στην υπόθεση της φασματικής κατανομής της πυκνότητας ισχύος της τυρβής που μπορεί να περιγραφεί από την συνάρτηση του Kaimal ή του von Karman. Και οι δύο κατανομές προσεγγίζονται με ένα ασυμπτωτικό όριο του  $f^{\frac{5}{3}}$  σε υψηλή συχνότητα που συμβαδίζει με τον νόμο του Kolmogorov, σύμφωνα με τον οποίο οι τυρβώδεις στροβιλισμοί οδεύουν από τις χαμηλότερες σε όλο και υψηλότερες συχνότητες όπου και τελικά καταστρέφονται λόγω της συνεκτικότητας του ρευστού.

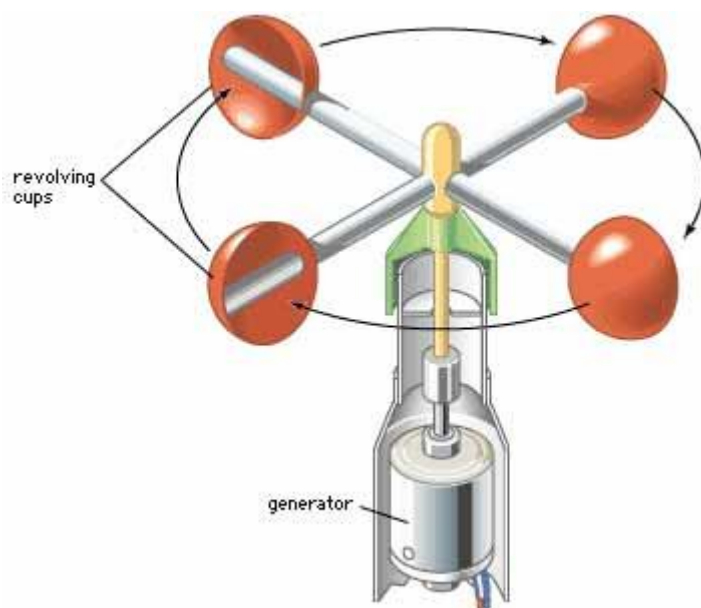
#### **1.2.2 Το αιολικό δυναμικό**

Η εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μίας περιοχής προέρχεται μετά από μια μακροχρόνια και τακτική διαδικασία μετρήσεων της ταχύτητας και της διεύθυνση το ανέμου. Ουσιαστικά, το αιολικό δυναμικό είναι μία εκτίμηση της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας ενός τόπου. Οι μετρήσεις αυτές είναι ευαίσθητες και για σωστά αποτελέσματα χρειάζεται κατάλληλη επιλογή θέσεως από εξειδικευμένο προσωπικό με εμπειρία.

Οι μετρήσεις αυτές περιλαμβάνουν την δειγματοληψία ανεμολογικών δεδομένων του επιθυμητού σημείου για ένα διάστημα τουλάχιστον ενός χρόνου, με συχνότητα δειγματοληψίας ανά 10 λεπτών. Η διαδικασία αυτή ξεκινάει με την εύρεση του ιδανικού σημείου, με την χρήση μεταλλικών ιστών στους οποίους τοποθετούνται ένα ή περισσότερα ανεμόμετρα σε ύψος 10μ. έως 60μ. πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Πολλές φορές χρησιμοποιούνται ιστοί μικρότεροι των 10μ. λόγω του μικρού τους κόστους. Αυτό γίνεται σε περιπτώσεις που δεν έχει οριστικοποιηθεί το τελικό σημείο τοποθέτησης. Μετά την εύρεση του σημείου, γίνεται μια προσπάθεια τοποθέτησης ιστού μεγαλύτερου ύψους του οποίου το ύψος να τείνει στο ύψος των εγκαθιστάμενων ανεμογεννητριών. Είναι σημαντικό πάντα να υπάρχει μια εποπτεία σε τακτά χρονικά διαστήματα των οργάνων για την επιβεβαίωση της σωστής τους λειτουργίας και εγγύτητας των δεδομένων.

### Όργανα μετρήσεων.

- Οι ανεμογράφοι καταγράφουν αθροιστικά την ταχύτητα περιστροφής που παίρνουν σε κάποια τμήματά τους από τον άνεμο και εξάγουν τα αποτελέσματά τους ως μια μέση τιμή.
- Τα ανεμόμετρα πίεσης χρησιμοποιούνται για την καταγραφή στιγμιαίων τιμών έντασης του ανέμου.
- Τα ανεμόμετρα θερμού στοιχείου καθώς και τα τύπου laser, χρησιμοποιούνται κάτω από συνθήκες εργαστηρίου, σε πειραματικές εγκαταστάσεις δηλαδή, όπου μελετώνται οι όμοροι των ανεμογεννητριών σε αεροδυναμικές σήραγγες.
- Τα πλέον γνωστά, τα κυπελλοφόρα ανεμόμετρα, καταγράφουν την ταχύτητα του ανέμου μετρώντας τον αριθμό των περιστροφών του κατακόρυφου άξονα με διάφορα συστήματα:
  - Μηχανικά στροφόμετρα
  - Ηλεκτρικές επαφές, οι οποίες κλείνουν μετά από ένα αριθμό περιστροφών ώστε να δώσουν μέση ταχύτητα.
  - Μικρές ηλεκτρογεννήτριες οι οποίες μετατρέπουν την περιστροφική κίνηση σε ηλεκτρικό ρεύμα και έπειτα στην ένδειξη της ταχύτητας.
  - Φωτοηλεκτρικό διακόπτη, ο οποίος μετατρέπει την ταχύτητα περιστροφής σε στιγμιαία ταχύτητα ανέμου στην έξοδο.



Εικόνα 6: Κυπελλοφόρο ανεμόμετρο ταχύτητας [9]

Ας σημειωθεί, ότι δεν υπάρχει άμεση συσχέτιση μεταξύ της περιστροφικής ταχύτητας του οργάνου  $\omega$  και της ταχύτητας του ανέμου  $u$  διότι ο λόγος  $u/\omega$  δεν είναι σταθερός. Τέλος, συχνά παρατηρείται οι ενδείξεις των ανεμομέτρων αυτών να είναι μεγαλύτερες των πραγματικών λόγω της αδράνειας που διατηρείται για λίγο, ακόμα και μετά την παύση του ανέμου, κατά την περιστροφή τους.

- Οι ανεμοδείκτες είναι υπεύθυνοι για την καταγραφή της διεύθυνσης του ανέμου, που σε συνδυασμό με τα άλλα όργανα μας επιτρέπουν την κατασκευή του ροδογράμματος που αναφέραμε προηγουμένως, που μας υποδεικνύει τις προσήνεμες και τις υπήνεμες περιοχές.

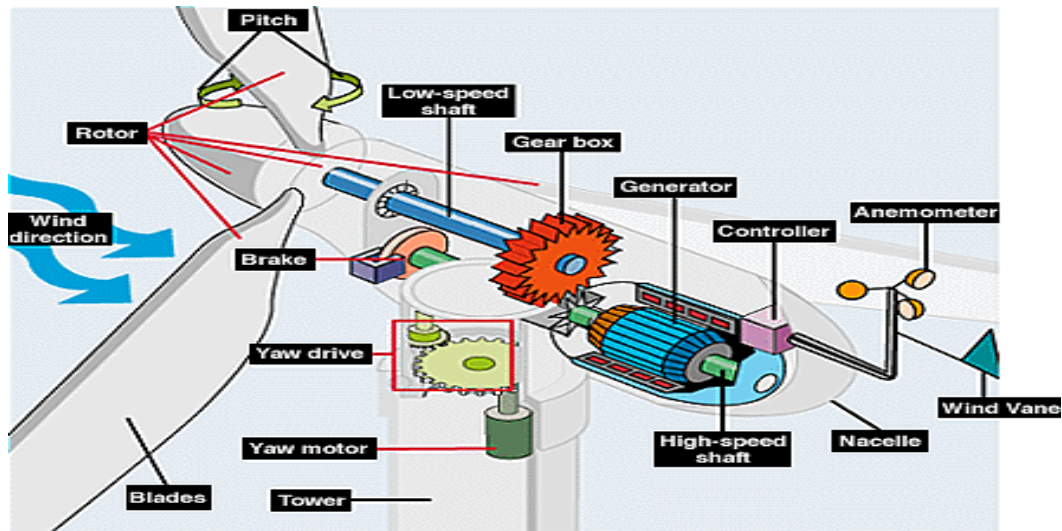
Μετά τις μετρήσεις, το πρόγραμμα καταγραφής των δεδομένων υπολογίζει στατιστικές τιμές και αποθηκεύει τα δεδομένα στην εσωτερική μνήμη όπου και περιμένει την ανάκτησή τους μέσω συσκευών μεταφοράς δεδομένων (DTG), GPRS modem ή GSM modem.

### 1.3 Ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες είναι οι απόγονοι των ανεμόμυλων, είναι η μετεξέλιξή των, με σκοπό την χρήση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται, μέσω της φόρτισης συσσωρευτών, συστημάτων δικτύων κατοικημένων περιοχών, δικτύων σε απομονωμένες περιοχές ή νησιά.

Ο τρόπος παραγωγής ενέργεια μιας ανεμογεννήτριας είναι σχετικά απλός. Ο άνεμος περιστρέφει τα πτερύγια, τα οποία είναι συνδεδεμένα με ένα κιβώτιο μετάδοσης κίνησης το οποίο πολλαπλασιάζει την ταχύτητα περιστροφής και κινεί μια γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Οι ανεμογεννήτριες είναι συχνά συνδεδεμένες με άλλες πηγές ενέργειας, έτσι ώστε να καλύπτεται το κενό που μπορεί να δημιουργηθεί από την έλλειψη ανέμου. Τα μεγάλα αιολικά πάρκα συνδέονται συνήθως κατευθείαν στο ηλεκτρικό δίκτυο.





Εικόνα 7: Μέρη μιας ανεμογεννήτριας [10]

### 1.3.1 Τύποι και χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες ξεχωρίζονται κυρίως μεταξύ των δύο τύπων τους βάσει τον προσανατολισμό του άξονά περιστροφής τους, δηλαδή κάθετα ή οριζόντια. Οι κάθετες ανεμογεννήτριες είναι εύλογα πιο εξελιγμένες τεχνολογικά. Ως γενικός κανόνας, είναι καλύτερες αποδοτικά διότι μπορούν να στρέφουν την γωνία πρόσπτωσης του ανέμου στις έλικές τους και να εκμεταλλευτούν την αεροδυναμική άνωση. Από την άλλη, οι κάθετες έχουν το σημαντικό πλεονέκτημα της καλύτερης προσαρμογής στην διεύθυνση του ανέμου με αποτέλεσμα να είναι καλύτερες σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν ισχυροί αλλά απρόβλεπτοι ως προς την φορά άνεμοι.

Άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών είναι το μέγεθος της δυνατής παραγόμενης ισχύος, ο αριθμός των πτερυγίων τους και η αναμενόμενη ταχύτητα περιστροφής. Η ταχύτητα περιστροφής της κορυφής του πτερυγίου λ ως προς την ταχύτητα του ανέμου εκφράζεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$\lambda = \frac{\omega_0 * R}{v} \quad (4.1)$$

Όπου  $\omega_0$  η γωνιακή ταχύτητα των πτερυγίων,  $R$  η ακτίνα της πτερωτής και  $v$  η ταχύτητα του ανέμου στον άξονα της μηχανής.

Η ταχύτητα περιστροφής εξαρτάται από τις αεροδυναμικές παραμέτρους, το μέγεθος και τον αριθμό των πτερυγίων. Η ταχύτητα στην οποία η ανεμογεννήτρια παράγει η ισχύ ίση με την μέγιστη ή

αλλιώς ονομαστική ισχύ της (rated power) , ονομάζεται ονομαστική ταχύτητα (rated wind speed) και συνήθως είναι 7-15m/s.

Η ελάχιστη ταχύτητα που χρειάζεται μία ανεμογεννήτρια ώστε να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα ονομάζεται ταχύτητα έναρξης λειτουργίας (cut in speed). Αυτό είναι και ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά μιας ανεμογεννητριών. Όσο χαμηλότερη αυτή η τιμή, τόσο μεγαλύτερη πιθανότητα έχει να παράγει ενέργεια, εφόσον οι χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου είναι πιο πιθανές. Έτσι, τα τελευταία χρόνια δίνεται έμφαση στην μείωση αυτής της τιμής. Η μέση τιμή ταχύτητας έναρξης μίας ανεμογεννήτριας είναι τα 5m/s.

Εκτός από την ελάχιστη, υπάρχει και η μέγιστη ταχύτητα ανέμου στην οποία επιτρέπεται η λειτουργία της ανεμογεννήτριας ή η ταχύτητα αποσύνδεσης (cut out speed). Στις μεγάλες ταχύτητες ανέμου διακόπτουμε την λειτουργία των ανεμογεννητριών και θέτουμε τα πτερύγια σε λειτουργία επιβράδυνσης ή φραγής ώστε να αποφευχθεί ζημιά σε αυτές. Οι τυπικές τιμές της ταχύτητας αποσύνδεσης είναι τα 25-30m/s.

Η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς μιας ανεμογεννήτριας υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$P = \frac{1}{2} * C_p * n * \rho * v^3 * A \quad (4.2)$$

Όπου  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα ( $\text{kg/m}^3$ ),  $C_p$  ο συντελεστής ισχύος,  $n$  η μηχανική/ηλεκτρική αποδοτικότητα,  $v$  η ταχύτητα του ανέμου και  $A$  η διατομή των πτερυγίων. Οι κατασκευαστές των ανεμογεννητριών παρέχουν την παραγόμενη ισχύς των ανεμογεννητριών τους συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου, οπότε δεν είναι απαραίτητος ο υπολογισμός αυτής της τιμής, πράγμα χρονοβόρο και αντικείμενο πολλής μελέτης.

Υπό ιδανικές συνθήκες, η μέγιστη τιμή του  $C_p$  (γνωστή ως όριο Betz) είναι  $16/27 = 0,593$ , δηλαδή μία ανεμογεννήτρια θεωρητικά μπορεί να αποσπάσει το 59,3% της αιολικής ενέργειας που εμπεριέχεται στον άνεμο. Πρακτικά αυτή η τιμή δεν μπορεί να ξεπεράσει το 50% λόγω των αεροδυναμικών απωλειών.

### 1.3.2 Η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας

Η καμπύλη ισχύος αποτελεί το σημαντικότερο χαρακτηριστικό μιας ανεμογεννήτριας και αποτελεί το κύριο κριτήριο για την σύγκριση μεταξύ των διαφόρων μοντέλων που θα συναντήσουμε. Η

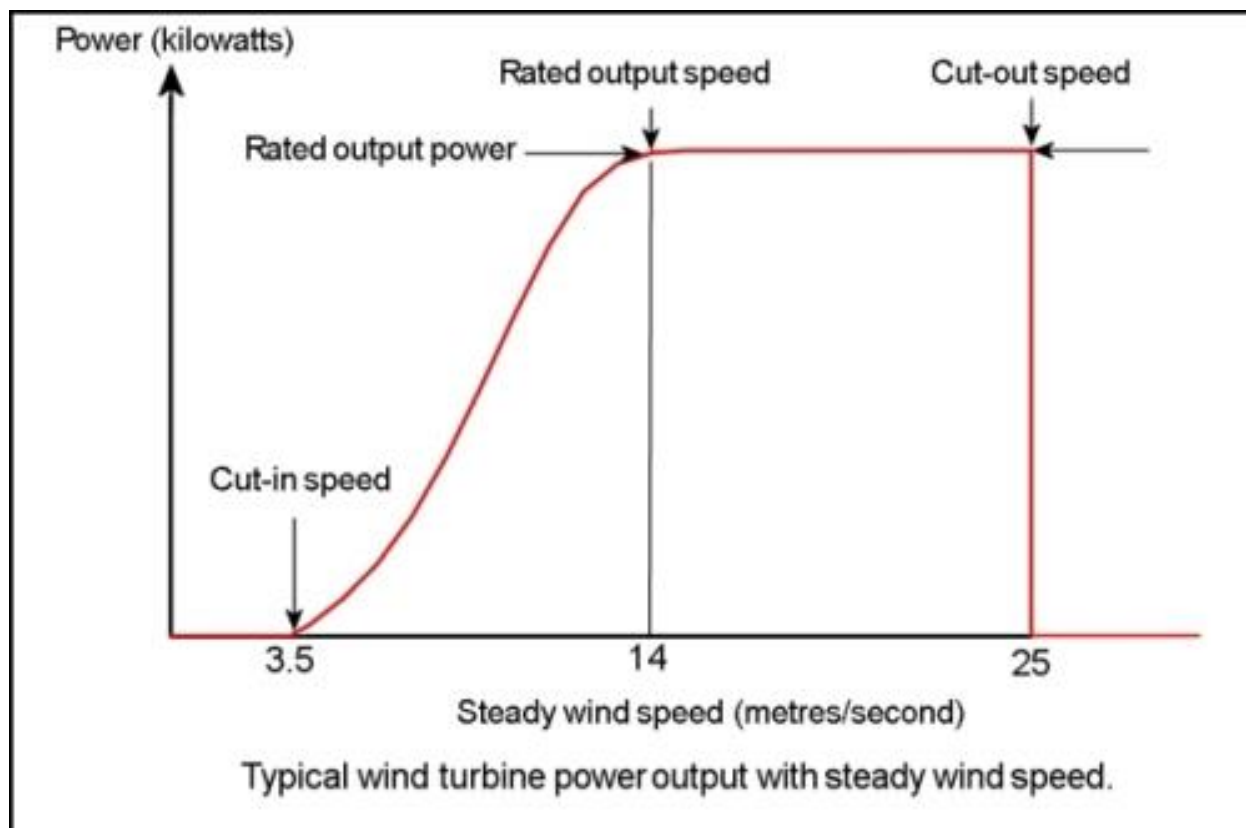
καμπύλη αυτή είναι συνάρτηση του συνόλου της τεχνολογίας και της τεχνογνωσίας που έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή της ανεμογεννήτριας καθώς και τις απώλειες και την απόδοση που έχει η ανεμογεννήτρια στην κατανομή του ανέμου της ζητούμενης περιοχής.

Όσον αφορά το κομμάτι των απωλειών, τα ηλεκτρικά και μηχανικά κομμάτια μιας ανεμογεννήτρια μπορούν να έχουν απώλειες λόγω:

- Τριβής.
- Αποτελεσματικότητας του κιβωτίου ταχυτήτων.
- Αποδοτικότητας της γεννήτριας και του αντιστροφέα.
- Μεταφοράς ή αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ανάγκη για τροφοδότηση των βοηθητικών λειτουργιών της ανεμογεννήτριας.

Η καμπύλη ισχύος χαρακτηρίζεται από τα τρία κύρια σημεία, όπως τα αναφέραμε προηγουμένως, που την καθορίζουν και διακρίνονται εμφανώς σε ένα διάγραμμα:

- Η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας (cut in speed)
- Η ονομαστική ταχύτητα (rated speed)
- Η ταχύτητα αποσύνδεσης (cut out speed)



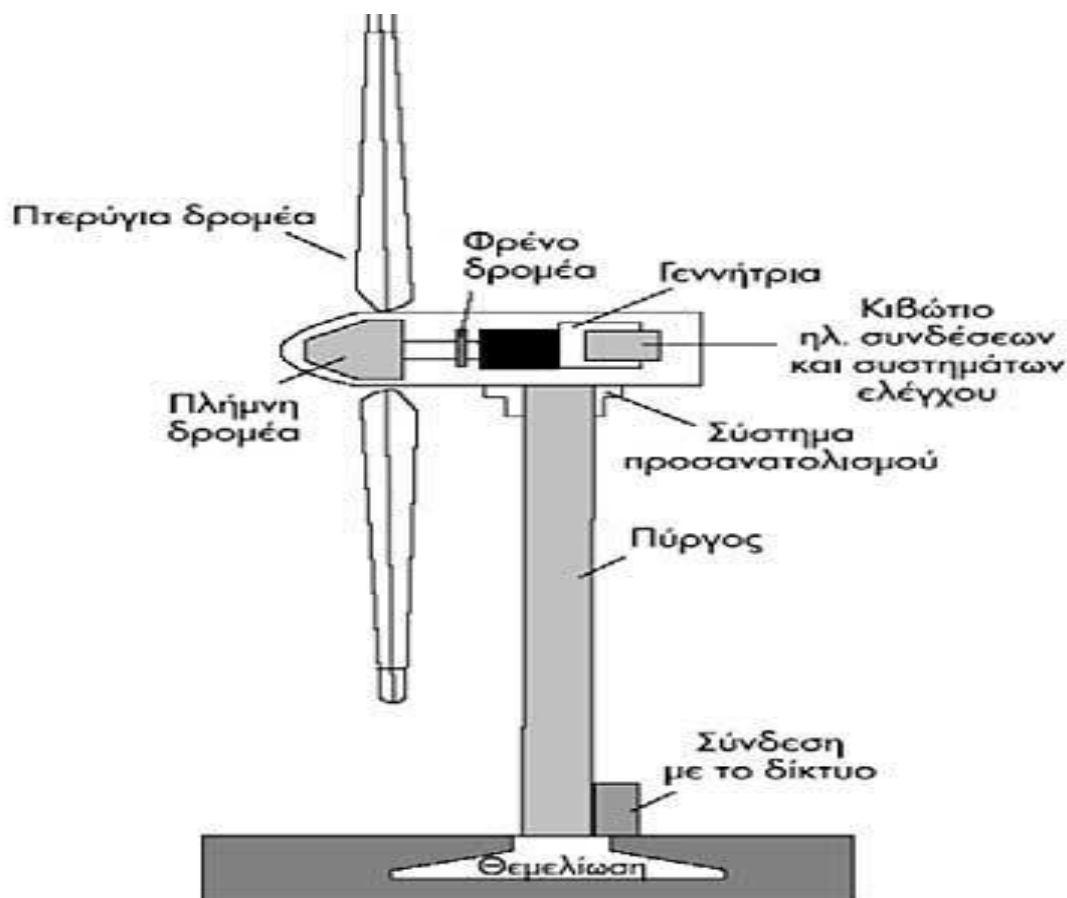
Εικόνα 8: Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας [11]

#### 1.3.4 Τα μέρη μιας ανεμογεννήτριας

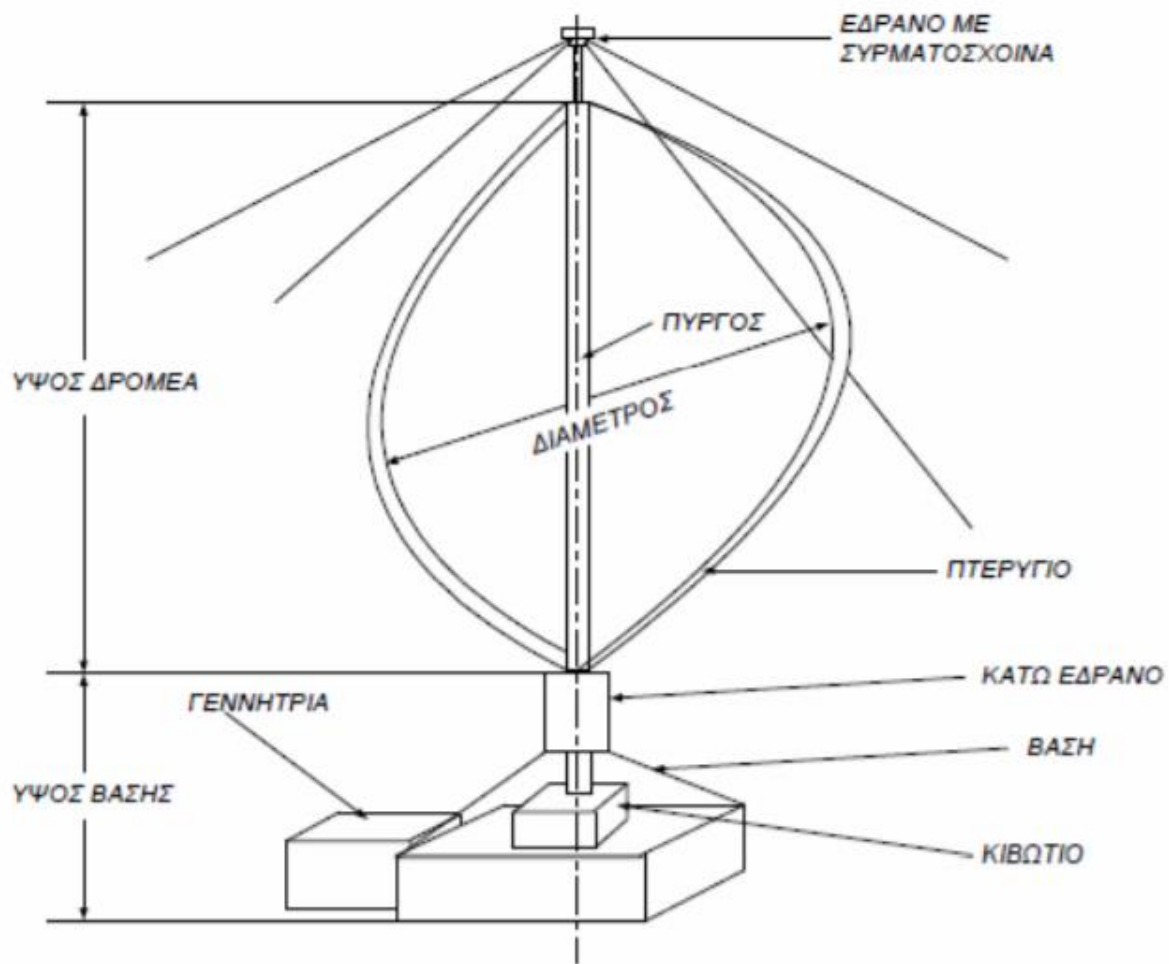
Μία τυπική ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα αποτελείται από τα παρακάτω μέρη με τις κάθετες ανεμογεννήτριες να αλλάζουν κυρίως ως προς την διάταξη και όχι ως προς τα λειτουργικά τους στοιχεία.

- Τον δρομέα, που αποτελείται συνήθως από τρία πτερύγια, τα οποία προσδένονται πάνω σε μια πλήμνη είτε σταθερά, είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από το διαμήκη άξονά τους μεταβάλλοντας το βήμα.
- Το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, αποτελούμενο από τον κύριο άξονα, τα έδρανα και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών το οποίο προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας. Η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή κατά την κανονική λειτουργία της μηχανής.

- Την ηλεκτρική γεννήτρια, σύγχρονη ή επαγωγική, η οποία συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή.
- Το σύστημα προσανατολισμού, το οποίο αναγκάζει συνεχώς τον άξονα περιστροφής του δρομέα να βρίσκεται παράλληλα με την διεύθυνση του ανέμου
- Τον πύργο, ο οποίος στηρίζει όλη την παραπάνω ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση.
- Τον ηλεκτρονικό πίνακα και τον πίνακα ελέγχου, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στη βάση του πύργου. Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί, συντονίζει αλλά και ελέγχει όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας, φροντίζοντας για την σωστή λειτουργία της.



Εικόνα 9: Μέρη μια ανεμογεννήτριας [12]



Εικόνα 10: Μέρη κάθετης ανεμογεννήτριας τύπου Darrieus [13]

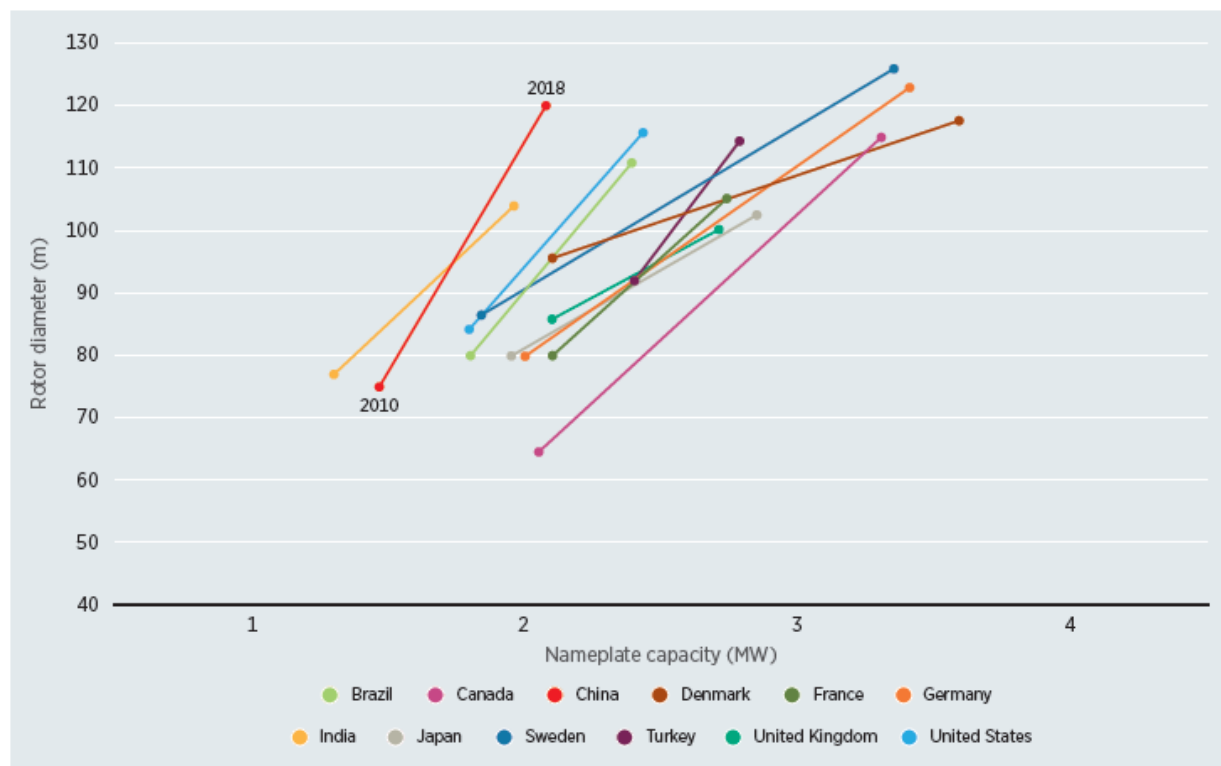
## 1.4 Κόστη κατασκευής και συντήρησης

Παρακάτω, θα μελετηθούν τα στατιστικά δεδομένα για ανεμογεννήτριες, που παρέχονται από τον διεθνή οργανισμό για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας IRENA στην έκθεσή του για το 2019.

### 1.4.1 Χαρακτηριστικά στοιχεία κόστους

#### Μεγέθη και τιμές

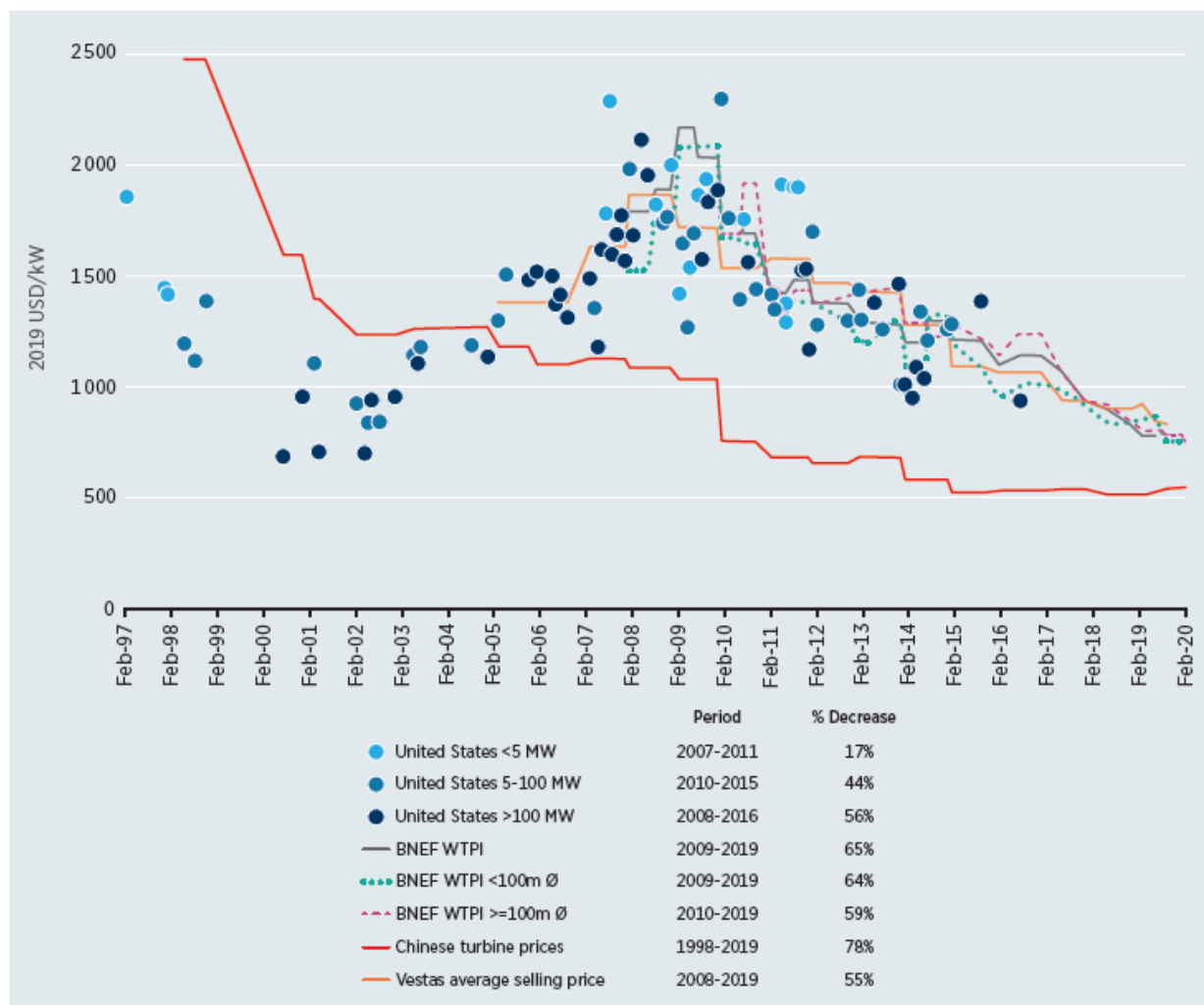
Οι κατασκευαστές ανεμογεννητριών έχουν μια ευρύ ποικιλία μεγεθών και εξοπλισμών για να μπορούν να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις του κάθε χώρου εγκατάστασης. αιολικού πάρκου. Μία αλλαγή του ύψους του κεντρικού άξονα ή και της διαμέτρου αυτού προσφέρει καμιά φορά μεγάλες αλλαγές στην επωφελούμενη απόδοση. Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται χρονικά η εξέλιξη των μεγεθών αυτών τα τελευταία χρόνια.



Source: Based on CanWEA, 2016; GlobalData (2020a); IEA Wind, 2020; Wiser and Bollinger, 2019; Danish Energy Agency, 2020; and Wood MacKenzie, 2020a.

Εικόνα 11: Σταθμισμένη μέση διάμετρος και ονομαστική ισχύς ανεμογεννητριών 2010-2018

Με την τεχνολογική εξέλιξη και το πέρασμα των ετών, βλέπουμε μια αύξηση στα μεγέθη των ανεμογεννητριών. Ειδικά χώρες, με μεγάλη τεχνολογική και οικονομική ανάπτυξη, όπως η Κίνα, να αυξάνουν πολύ τις μέσες διαμέτρους και ισχύς την τελευταία περίοδο. Ταυτόχρονα όμως, όπως βλέπουμε στο παρακάτω διάγραμμα, και συγκεκριμένα στην Κίνα, μιας και έχει από τις μεγαλύτερες αγορές και την μεγαλύτερη ανάπτυξη, έχει πέσει πολύ η μέση τιμή ανά KWh την τελευταία εικοσαετία. Αν και πρέπει να σημειωθεί ότι η παγκόσμια οικονομική είχε επηρεάσει πολύ την τιμή τους και έτσι παρατηρείται σημαντική αύξηση κατά την περίοδο 2005-2015 με κορύφωση το 2009.



Source: Based on Wiser & Bollinger, 2019; BNEF, 2019a; Vestas Wind Systems, 2005-2020; and the IRENA Renewable Cost Database.

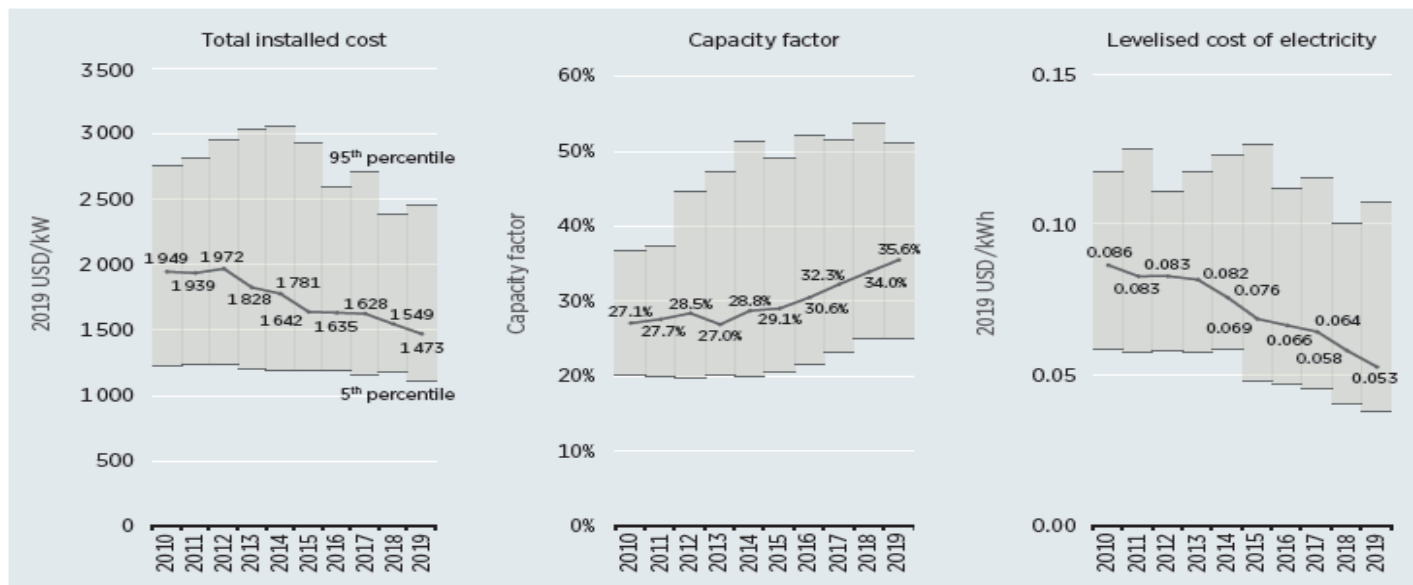
## Εικόνα 12: Δείκτες τιμών ανεμογεννητριών και τάσεις τιμών

### Κόστη εγκατάστασης

Όπως το οτιδήποτε που έχει να κάνει με τεχνολογική πρόοδο, έτσι και η αιολική ενέργεια έχει σταθεί στο επίκεντρο της ανάπτυξης. Η βιωσιμότητα ενός αιολικού πάρκου την πλευρά της οικονομίας έχει περάσει πολλά στάδια και τώρα πλέον φαίνεται να έχει αυξανόμενη προοπτική, καθώς ακόμα και το μεγαλύτερο πρόβλημα αυτό της μεταφοράς και της εγκατάστασης, έχει πέσει σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα και αναμένεται, οι τιμές να πέσουν ακόμα περισσότερο τα επόμενα χρόνια.

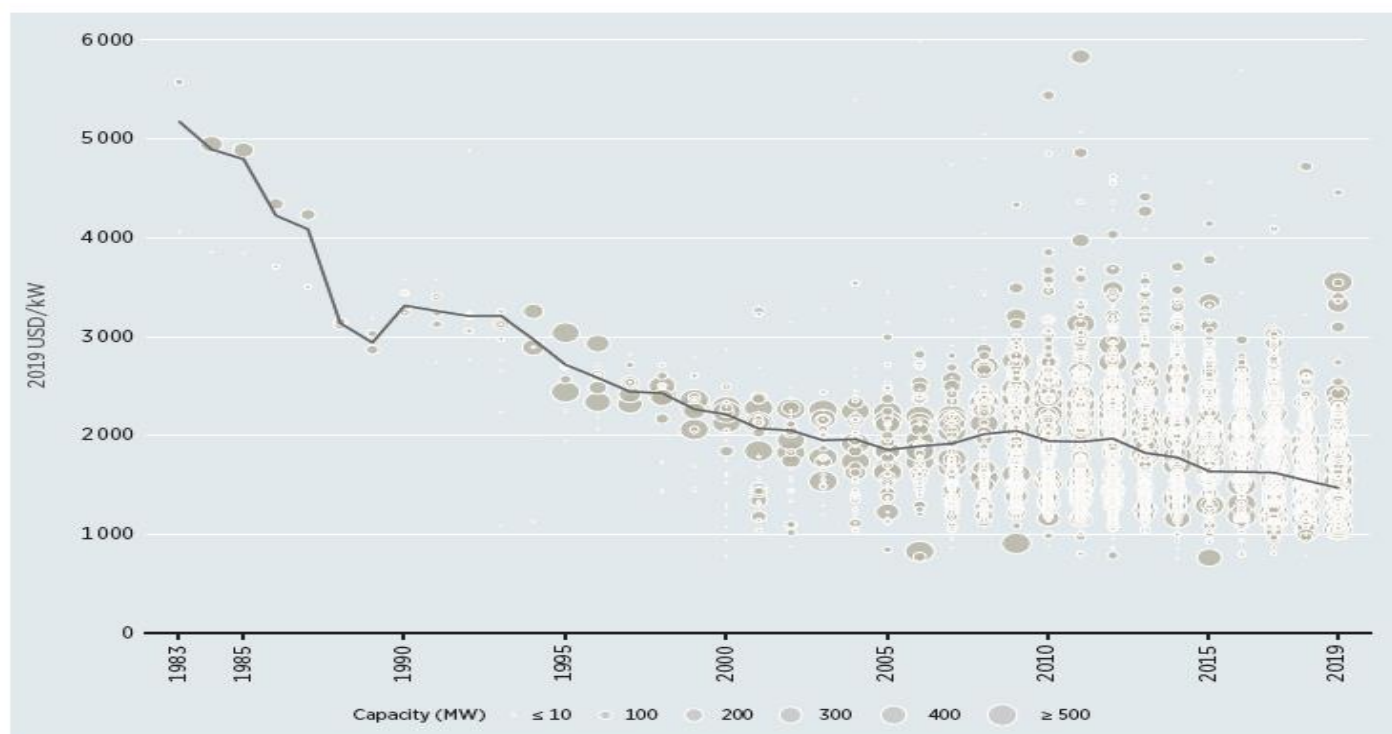
Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η εξέλιξη από τα κόστη εγκατάστασης στην πάροδο των χρόνων σε παγκόσμιο αλλά και σε επίπεδο χωρών.





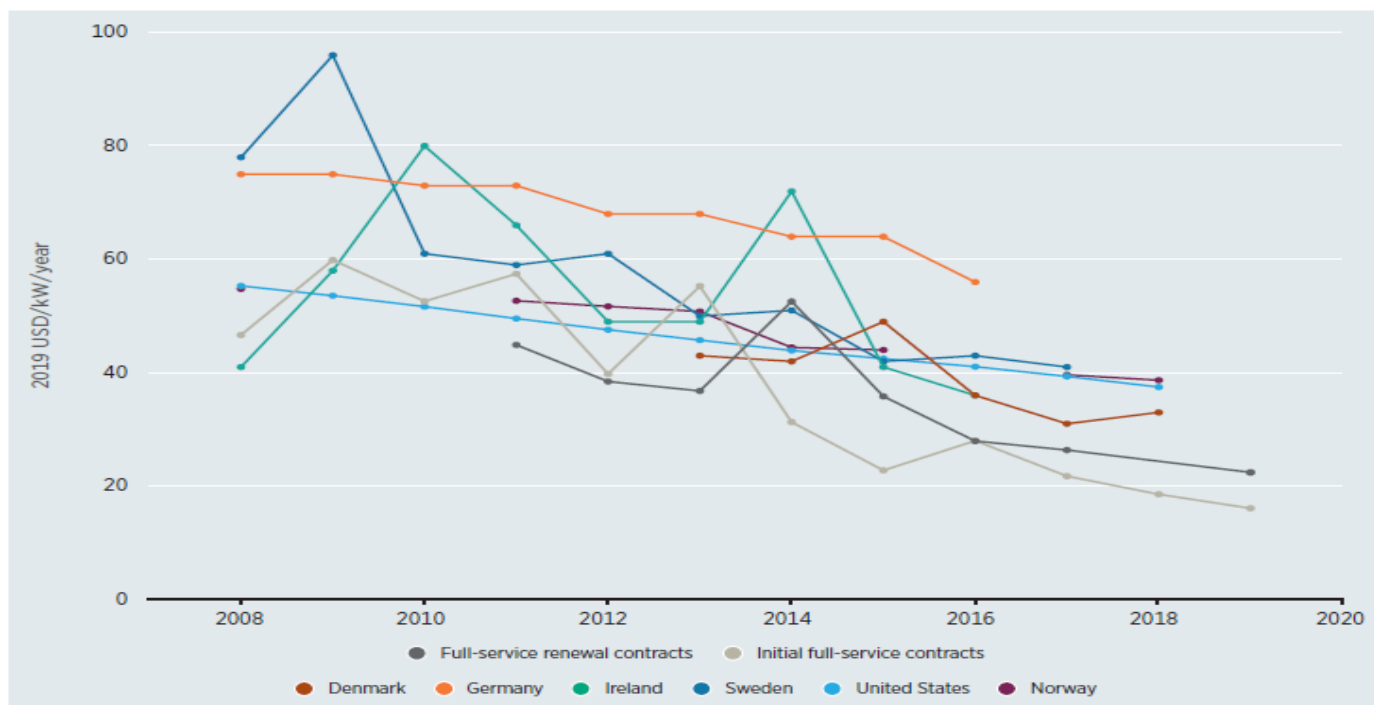
Source: IRENA Renewable Cost Database.

Εικόνα 13: Μέσα σταθμισμένα συνολικά κόστη εγκατάστασης, συντελεστή αποδοτικότητας και σταθμισμένο κόστος παραγωγής ενέργειας




Source: IRENA Renewable Cost Database.

Εικόνα 14: Συνολικό και σταθμισμένο κόστος εγκατάστασης



Source: BNEF, 2019b and IEA Wind, 2020.

Εικόνα 15: Πλήρες κόστος εγκατάστασης και συντήρησης ανά περιοχή/χώρα

	2010			2019		
	5 <sup>th</sup> percentile	Weighted average	95 <sup>th</sup> percentile	5 <sup>th</sup> percentile	Weighted average	95 <sup>th</sup> percentile
	(2019 USD/kW)					
Africa	2 226	<b>2 291</b>	3 196	1 448	<b>1 952</b>	2 189
Other Asia	1 829	<b>2 501</b>	2 762	1 392	<b>2 368</b>	3 709
Central America and the Caribbean	2 497	<b>2 664</b>	2 787	1 737	<b>1 737</b>	1 737
Eurasia	2 284	<b>2 432</b>	2 501	1 277	<b>1 633</b>	2 035
Europe	1 575	<b>2 405</b>	3 602	1 071	<b>1 800</b>	2 233
North America	1 594	<b>2 407</b>	3 696	1 099	<b>1 636</b>	2 162
Oceania	2 993	<b>3 501</b>	3 882	1 157	<b>1 555</b>	1 788
Other South America	2 399	<b>2 644</b>	2 729	1 123	<b>1 718</b>	2 270
Brazil	2 252	<b>2 539</b>	2 603	1 224	<b>1 559</b>	2 061
China	1 173	<b>1 491</b>	2 038	1 115	<b>1 223</b>	1 340
India	1 013	<b>1 412</b>	1 941	1 039	<b>1 055</b>	1 082

Source: IRENA Renewable Cost Database.

Εικόνα 16: Συνολικό και σταθμισμένο κόστος εγκατάστασης ανά περιοχή/χώρα

### Συντελεστής αποδοτικότητας

Ο συντελεστής αποδοτικότητας αναφέρεται ταυτόχρονα και στη τεχνολογική πρόοδο που αφορά την βελτίωση των κατασκευών αλλά επίσης και στην ικανότητα της επιστημονικής κοινότητας να αξιοποιήσει καλύτερα τα δεδομένα που έχει λάβει ώστε να βελτιστοποιήσει των εκμετάλλευση της εκάστοτε περιοχής. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται βελτίωση του συντελεστή αυτού ανά χώρες στην περίοδο 2010-2019.


	2010	2019	Percentage change 2010-2019
	%		
Denmark	27	39	↑ 44%
Spain	27	39	↑ 44%
Brazil	36	51	↑ 42%
United States	33	44	↑ 33%
Turkey	26	34	↑ 33%
Sweden	29	38	↑ 33%
India	25	32	↑ 30%
Italy	26	33	↑ 30%
Germany	24	31	↑ 30%
France	27	33	↑ 25%
China	26	32	↑ 24%
Canada	32	39	↑ 21%
United Kingdom	30	33	↑ 9%
Japan	24	25	↑ 4%
Mexico	40	35	↓ 13%

Source: IRENA Renewable Cost Database.

### Εικόνα 17: Μέσος συντελεστής αποδοτικότητας ανά περιοχή/χώρα

#### Σταθμισμένο κόστος παραγωγής ενέργειας

Στον παρακάτω πίνακα έχουμε την εξέλιξη του σταθμισμένου κόστους παραγωγής ενέργειας σε διάφορες περιοχές και χώρες ανά τον κόσμο.

	2010			2019		
	5 <sup>th</sup> percentile	Weighted average	95 <sup>th</sup> percentile	5 <sup>th</sup> percentile	Weighted average	95 <sup>th</sup> percentile
	(2019 USD/kWh)					
Africa	0.061	<b>0.100</b>	0.119	0.050	<b>0.067</b>	0.072
Other Asia	0.090	<b>0.117</b>	0.129	0.057	<b>0.099</b>	0.131
Central America and the Caribbean	0.080	<b>0.086</b>	0.131	0.061	<b>0.061</b>	0.061
Eurasia	0.089	<b>0.108</b>	0.123	0.048	<b>0.064</b>	0.093
Europe	0.067	<b>0.107</b>	0.143	0.037	<b>0.067</b>	0.096
North America	0.051	<b>0.089</b>	0.144	0.035	<b>0.051</b>	0.082
Oceania	0.101	<b>0.117</b>	0.155	0.043	<b>0.054</b>	0.071
Other South America	0.087	<b>0.101</b>	0.131	0.039	<b>0.057</b>	0.092
Brazil	0.080	<b>0.095</b>	0.120	0.032	<b>0.048</b>	0.056
China	0.051	<b>0.072</b>	0.101	0.037	<b>0.046</b>	0.064
India	0.050	<b>0.083</b>	0.120	0.036	<b>0.049</b>	0.070

Source: IRENA Renewable Cost Database.

Εικόνα 18: Σταθμισμένα κόστη παραγωγής ενέργειας ανά περιοχή/χώρα

## 1.5 Οι μέθοδοι συντήρησης

Ένα σημαντικό κομμάτι της επένδυσής είναι τα λειτουργικά κόστη της ανεμογεννήτριας. Η συντήρηση μιας ανεμογεννήτριας είναι ένα από τα σημαντικότερα κομμάτια καθώς εξασφαλίζει την μακροζωία της. Τα τελευταία χρόνια, έχουν γίνει τεχνολογικά άλματα που έχουν επηρεάσει σημαντικά την μείωση του κόστους συντήρησης. Ένα από αυτά είναι η εξέλιξη και εξάπλωση των drone.

Παλαιότερα, η εποπτείας της φθοράς μιας ανεμογεννήτριας ήταν μια επίπονη διαδικασία κατά την οποία τα συνεργεία έπρεπε να σταματήσουν την λειτουργία της ανεμογεννήτριας και με την βοήθεια γερανών, σχοινιών ή άλλο τρόπων την εκτελούταν δια οφθαλμού. Το αποτέλεσμα ήταν μια επικίνδυνη και χρονοβόρα διαδικασία.

Πλέον με την επάνοδο των drone αλλά και τις τεχνολογίας που τα περιβάλλει υπάρχει η δυνατότητα να εκτελεσθεί η εποπτεία αυτή, με ταχύτητα και ασφάλεια. Ο τρόπος είναι απλός, φρενάρεται η ανεμογεννήτρια, δεν χρειάζεται πλήρης ακινησία, και κάνοντας μία προσχεδιασμένη και ημιαυτοματοποιημένη πτήση με το drone, το οποίο βγάζει πολλαπλές φωτογραφίες πολύ υψηλής ανάλυσης και τις εντάσσουμε σε ένα κατάλληλο πρόγραμμα το οποίο τις συνθέτει σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο για την ολοκλήρωση του ελέγχου με την ασφάλεια του γραφείου μας.

Παρακάτω, παραθέτονται φωτογραφίες και υπερσύνδεσμοι από μια τέτοια εργασία, από την εταιρία Inspiredrone.







## Κεφάλαιο 2

### 2.1 Επιλογής της ανεμογεννήτριας

Για την επιλογή της κατάλληλης ανεμογεννήτριας, χρησιμοποιήθηκε σε μία λίστα 34 ανεμογεννητριών κάθετου και οριζόντιου άξονα, ανανεωμένη τον Μάιο του 2020. Επικεντρωθήκαμε σε ανεμογεννήτριες μικρής ενεργειακής ισχύος, έως 50kW, διότι θεωρητικά η κατασκευή θα γίνει εντός του χώρου του πολυτεχνείου, έτσι δεν θα μπορούσαμε να κάνουμε κάποια πολύ μεγάλη εγκατάσταση.

Τα ανεμολογικά δεδομένα, αρχικά, ήταν για όλο το έτος του 2019 με δειγματοληψία ανά 3 ώρες, σε σύνολο 2897 από την EMY με στρογγυλοποίηση σε ακέραιες τιμές για την ταχύτητα του ανέμου. Εν τέλει, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MERRA-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications) το οποίο μας παρέχει λεπτομερέστερα και πιο ακριβή δεδομένα, με δειγματοληψία ανά 10 λεπτά με ακρίβεια δύο δεκαδικών ψηφίων, 52560 σε σύνολο. Η διαφορά βέβαια είναι ότι τα δεδομένα προέρχονται μέσω της μεθόδου της γραμμικής παρεμβολής και έχουν ακρίβεια 50χλμ. Λόγω όμως του πλήθους και της ακρίβειάς που μπορούν να μας προσφέρουν, μιας και είναι θεωρητική εργασία, θα χρησιμοποιηθούν αυτά.

Οι τρόποι συγκρίσεως των ανεμογεννητριών είναι με βάση την αναμενόμενη παραγωγή ενέργειας σε ύψη των 10μ, 20μ, 30μ, 40μ και 50μ.

- Απλή σύγκριση των απτών δεδομένων του 2019-2020
- Με χρήση της κατανομής Weibull

#### 2.1.1 Ο αλγόριθμος της επιλογής

Ξεκινάει ο αλγόριθμος με την εισαγωγή των δεδομένων από δύο εξωτερικά αρχεία:

- Την βάση δεδομένων σε μορφή excel που έχει δημιουργηθεί με τα δεδομένα των ανεμογεννητριών
- Τα δεδομένα της ταχύτητας(μέσης και μέγιστης), θερμοκρασίας και υγρασίας του ανέμου

Έπειτα, πινακοποιούνται και αρχικοποιούνται τα δεδομένα για να ξεκινήσει η διαδικασία.

```

%Εισαγωγή δεδομένων
wmd = readtable('WindmillDatabase2.xls','Range','A1:AK35');
wdd = readtable('SoDa_MERRA2_TUC_2019.csv'); %Δεδομένα του 2019 με δείγματα ανά 10 λεπτά
Dnum=size(wdd,1); %Μέγεθος δεδομένων αέρα
Wnum=size(wmd,1); %Μέγεθος βάσης δεδομένων ανεμογεννητριών
dTime=365.25*24/Dnum; %Ο χρόνος δειγματοληψίας των δεδομένων

%Πινακοποίηση δεδομένων ανεμογεννητριών
h1=1:size(wmd,2)-6;
h2=size(wmd,2);
Name=wmd(:,1); %Όνομα ανεμογεννήτριας
Type=wmd(:,2); %Οριζόντια ή Κάθετη
Power=wmd(:,3); %Ονομαστική Δύναμη ανεμογεννήτριας
Price=wmd(:,4); %Τιμή
Diameter=wmd(:,5); %Διάμετρος έλικας
Cutout=wmd(:,6); %Ταχύτητα στάσης έλικας
Cutin=wmd(:,7); %Ταχύτητα έναρξης έλικας
PWSpeed=wmd(:,8:h2); %Παραγωγή ενέργειας ταχύτητα ανέμου i
T = table(Name,Type,Power,Price, Diameter, Cutout, Cutin, PWSpeed);
hub= [10 20 30 40 50]; %πιθανά σχετικά ύψη ανεμογεννητριών, μηδέν είναι το ύψος εδάφους-λήψης των δεδομένων.
Aep= zeros(Wnum,size(hub,2)); %Ετήσια Παραγωγή ενέργειας
AepWeib= zeros(Wnum,size(hub,2)); %Ετήσια Παραγωγή ενέργειας με χρήση της κατανομής Weibull
Cf= zeros(Wnum,size(hub,2)); %Ετήσια Παραγωγή ενέργειας
CfWeib= zeros(Wnum,size(hub,2)); %Ετήσια Παραγωγή ενέργειας με χρήση της κατανομής Weibull

```

Εικόνα 19: Εισαγωγή και αρχικοποίηση δεδομένων

Πρώτα, γίνεται η εύρεση της πυκνότητας του υγρού αέρα. Η συνήθης προσέγγιση της τιμής της αυτής είναι μια απλή, αλλά μη ικανοποιητική διαδικασία καθώς έχει σημαντική απόκλιση από την πραγματική τιμή. Από την ιστοσελίδα της Matlab, βρέθηκε ένας αλγόριθμος για τον υπολογισμό της ακριβής τιμής της πυκνότητας του υγρού αέρα με την περίπλοκη διαδικασία, ώστε να προσεγγιστούν σωστότερα αποτελέσματα.

Οι τύποι που χρησιμοποιούνται για την εύρεση αυτή είναι οι παρακάτω:

$$\rho_{humid\ air} = \frac{p_d}{R_d T} + \frac{p_v}{R_v T} = \frac{p_d M_d + p_v M_v}{RT}$$

Όπου:

$\rho_{humid\ air}$  = Η πυκνότητα του υγρού αέρα (kg/m<sup>3</sup>)

$p_d$  = μερική πίεση ξηρού αέρα (Pa)

$R_d$  = Ειδική σταθερά για τον ξηρό αέρα, 287,058 J/(kg\*K)

$T$  = Θερμοκρασία (K)

$p_v$  = πίεση υδρατμού (Pa)

$R_v$  = Ειδική σταθερά υδρατμού , 461,495 J/(kg\*K)

$M_d$  = Μοριακή μάζα ξηρού αέρα, 0,028964 kg/mol



$M_v$  = Μοριακή μάζα υδρατμού, 0,018016 kg/mol

$R$  = Γενική σταθερά αερίων, 8,314 J/(K\*mol)

Για να υπολογιστεί η πίεση του υδρατμού:

$$p_v = \phi * p_{sat}$$

όπου

$\phi$  = σχετική υγρασία

$$p_{sat} = 6,1078 * 10^{\frac{7,5T}{T+237,3}}$$

Όπου  $T$  η θερμοκρασία σε C.

Και τέλος  $p_d = p - p_v$

Όπου  $p$  η απόλυτη πίεση

Έπειτα υπολογίζονται με βάση τον εκθετικό νόμο (3.1) οι νέες ταχύτητες για τα διαφορετικά ύψη για τις ανεμογεννήτριες.

```
%Υπολογισμός πυκνότητας υγρού αέρα
for i=1:Dnum
    wdd.Density(i,1) = densityofair((wdd.Temperature(i,1)-273.15),wdd.Pressure(i,1),wdd.Relative_Humidity(i,1)/100);
end
Avad=mean(wdd.Density);

%Για την σχετική υψομετρική διαφορά στα διάφορα ύψη ανεμογεννητριών
%(maxδH:15m) έχουμε αμελητέα διαφορά στην ατμοσφαιρική πυκνότητα έτσι δεν θα
%χρησιαστεί υπολογισμός.

%Μέσο Υψόμετρο πολυτεχνείου 145μ.
%Υψόμετρο λήψης μετεωρολογικών δεδομένων ~145μ.
%%

%Συνυπολογισμός υψομετρικής διαφοράς στην ταχύτητα του ανέμου για διάφορα ύψη πύργου ανεμογεννητριών
a=0.194; %Μελέτη του 2005 για τον συντελεστή τυρβώδους ανέμου
for i = 1:Dnum
    for ii = 2:size(hub,2)
        wdd.Wind_speed(i,ii)= wdd.Wind_speed(i,1)*((hub(ii)+145)/(hub(1)+145))^a;
    end
end
%%
```

Εικόνα 20: Υπολογισμός πυκνότητας υγρού αέρα και ταχύτητα στα διάφορα ύψη.

Η κατανομή Weibull είναι η πλέον διαδεδομένη για την περιγραφή ανεμολογικών στοιχείο έως το υψόμετρο των 100μ. και χρησιμοποιείται συνεχώς για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού.

Η κατανομή Weibull καθορίζεται από δύο παραμέτρους και εκφράζεται ως η πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου μιας περιοχής να πάρει την τιμή  $u$ .

Η κατανομή αυτή περιγράφεται από την σχέση:

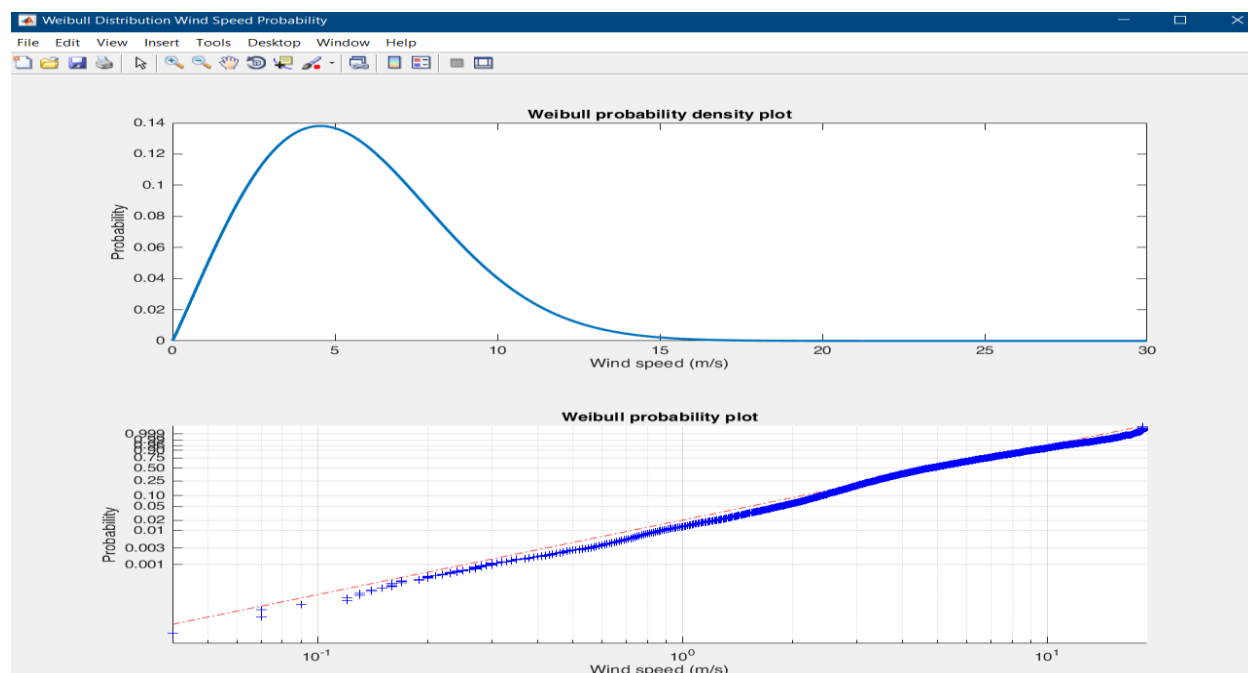
$$f(u) = \frac{k}{c} * \left[ \frac{V}{c} \right]^{k-1} * e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k}$$

Όπου  $k$  η παράμετρος μορφής ή κλίσης (shape parameter) και  $c$  η παράμετρος κλίμακας ή μεγέθους (scale parameter).

Οι παράμετροι  $k$  και  $c$  ποικίλουν ανάλογα με την περιοχή καθώς επηρεάζονται από τις κλιματικές συνθήκες και το εδαφικό ανάγλυφο. Γενικότερα, η  $c$  μας δείχνει την ένταση των ανέμων και η  $k$  πόσο απότομη είναι η καμπύλη.

Η Matlab είναι εξοπλισμένη με κατάλληλες συναρτήσεις, ώστε βάσει των δεδομένων που ήδη υπάρχουν, να μπορέσει να υπολογίσει και τις δύο παραμέτρους και εν τέλει την κατανομή. Η συνάρτηση που χρησιμοποιείται είναι η `fitdist`, η οποία ουσιαστικά προσαρμόζει τα δεδομένα μας στην Weibull, όπως φαίνεται παρακάτω, με τον άξονα  $x$  να αντιστοιχεί στην ταχύτητα του ανέμου και το άξονα  $y$  στην πιθανότητα εμφάνισης αυτής της ταχύτητας.

Όπως, φαίνεται και οι δύο καμπύλες εμφανίζουν επιθυμητή μορφή. Η πιθανότητα εμφάνισης του ανέμου συμβαδίζει με την κατανομή Weibull που σημαίνει ότι τα ανεμολογικά δεδομένα είναι καλής αξιοπιστίας.



```

%Κατανομή Weibull στα δεδομένα του αέρα για δεύτερη προσέγγιση υπολογισμού
%ΑΕΡ

figure('Name','Weibull Distribution Wind Speed Probability','NumberTitle','off','pos',[10 10 1034 778])
subplot(2,1,1)
for i = 1:size(hub,2)
    pd(i) = fitdist(wdd.Wind_speed(:,i),'Weibull');
    x_values = 0:0.1:30;
    y = pdf(pd(i),x_values);
    plot(x_values,y,'LineWidth',2)
end
title('Weibull probability density plot')
ylabel('Probability')
xlabel('Wind speed (m/s)')
%%
subplot(2,1,2)
wblplot(wdd.Wind_speed(:,1))
title('Weibull probability plot')
ylabel('Probability')
xlabel('Wind speed (m/s)')
%%

```

Εικόνα 21: Κατανομή Weibull

Τέλος, για τον τελικό αλγόριθμο των δύο διαδικασιών, υπολογίζεται η ενεργειακή απόδοση των ανεμογεννητριών.

```

%Υπολογισμός ετήσιας παραγωγής ενέργειας
for i=1:Wnum %36
    for iv=1:size(hub,2)%4
        if T.Diameter(i,1)/(2*hub(iv))<=0.55 && T.Diameter(i,1)/(2*hub(iv))>=0.15 %H ελάχιστη και μέγιστη αναλογία ύψους πύργου προς διάμετρο
            for iii= 1:size(T.PWspeed,2) %30
                if iii<=Cutout(i,1) && iii>=Cutin(i,1)
                    AepWeib(i,iv)=T.PWspeed(i,iii)*pdf(pd(iv),iii)*8766+AepWeib(i,iv);
                end
            end
        end
        for ii=1:Dnum %52760
            if round(wdd.Wind_speed(ii,iv))>0
                Aep(i,iv)=dTime*(wdd.Density(ii,1)/Avad)* T.PWspeed(i,round(wdd.Wind_speed(ii,iv))) +Aep(i,iv);
            end
        end
    end
end
end
%%

[AepM,AepMp]=max(Aep); %Παραγωγή και θέσεις αποδοτικότερων ανεμογεννητριών με βάση την ετήσια παραγωγή ενέργειας
[AepWeibM,AepWeibMp]=max(AepWeib); %Παραγωγή και θέσεις αποδοτικότερων ανεμογεννητριών με την Weibull βάση την ετήσια παραγωγή ενέργειας

```

Οι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι παρακάτω:

$$AEP = (8766) \int_0^{\infty} P(v)f(v:\lambda,k)dv$$

Όπου

AEP= Ετήσια παραγωγή ενέργειας

8766= οι ώρες στην διάρκεια ενός έτους

P(v)= η συνάρτηση που περιγράφει την απόδοση της ανεμογεννήτριας σε μία ταχύτητα v

$f(v;\lambda,k)$  = η κατανομή Weibull

Στην δεύτερη μέθοδο, χρησιμοποιείται την εξίσωση αυτή:

$$P_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \frac{\rho_{\text{adj}}}{\rho} A v^3$$

Σε ελαφρώς, διαφορετική μορφή, λόγω των δεδομένων, όπου η τιμή  $1/2Av^3$  αντιστοιχεί στην ονομαστική τιμή της ανεμογεννήτριας, από την εταιρία, για την παραγωγή ενέργειας, για την ταχύτητα ανέμου  $v$ , αλλά με την ίδια λογική και αποτέλεσμα.

*Να σημειωθεί ότι σε κάθε περίπτωση υπήρχε περιορισμός όπου απέτρεπε τον υπολογισμό ανεμογεννητριών με μεγάλη διαφορά διαμέτρου πτερυγίων σε σχέση με το ύψος του πύργου, πράγμα που θα προκαλούσε σαφώς προβλήματα λειτουργικότητας αλλά και πρακτικότητας. Ο περιορισμός αυτός βγήκε από ακραίες περιπτώσεις κατασκευής πραγματικών αιολικών έργων.*

Έπειτα υπολογίζεται ο δείκτης αποδοτικότητας της εκάστοτε ανεμογεννήτριας.

```
for j = 1:size(hub,2) %4
    for i = 1:Wnum
        Cf(i,j) = Aep(i,j)/(T.Power(i,1)*8760);
        CfWeib(i,j) = AepWeib(i,j)/(T.Power(i,1)*8760);
    end
end

[CfM,CfMp]=max(Cf); %Παραγωγή και θέσεις αποδοτικότερων ανεμογεννητριών με βάση τον δείκτη αποδοτικότητας
[CfWeibM,CfWeibMp]=max(CfWeib); %Παραγωγή και θέσεις αποδοτικότερων ανεμογεννητριών με την Weibull με βάση τον δείκτη αποδοτικότητας
```

$$CF = \frac{AEP}{P_r t}$$

Όπου,

CF = δείκτης αποδοτικότητας, δηλαδή, το ποσοστό του χρόνου, κατά τον οποίο η ανεμογεννήτρια είναι ενεργή.

AEP = Ετήσια παραγωγή ενέργειας (Annual Energy Production)

$P_r$  = Η ονομαστική δύναμη της ανεμογεννήτριας (Rated power)

$t$  = 8760, το πλήθος των ωρών σε ένα χρόνο.

Και οι δύο μέθοδοι, στατιστική και δειγματική, εμφανίζουν το ίδιο αποτέλεσμα και στα δύο κριτήριά μας, πράγμα που υποδεικνύει ότι οι διαδικασίες, ακολουθούν τον σωστό δρόμο. Όπως αναμενόταν, οι καμπύλες ισχύος των ανεμογεννητριών με μεγαλύτερη ενεργειακή δυνατότητα (περισσότερα kW) είναι στην κορυφή της λίστας, όσον αφορά την παραγωγή ενέργειας.

Η πραγματική σύγκριση ξεκινάει με τον συνυπολογισμό του κόστους. Το οικονομικό κριτήριο που θα χρησιμοποιήσουμε είναι το σταθμισμένο κόστος παραγωγής ενέργειας:

```
N = 20; %Ετη επενδυτικής περιόδου
d = 0.1; %ποσοστό έκπτωσης
Ac = 42; %Ετήσια κόστη λειτουργίας
Ic = 1800; %Κόστος αρχικής εγκατάστασης
LCoE = zeros(Wnum,size(hub,2)); %Σταθμισμένο κόστος ενέργειας
LCoEWeib = zeros(Wnum,size(hub,2)); %Σταθμισμένο κόστος ενέργειας
L1 = zeros(1); %βοηθητική μεταβλητή
L2 = zeros(1); %βοηθητική μεταβλητή
L3 = zeros(1); %βοηθητική μεταβλητή

for j = 1:size(hub,2)
    for i = 1:Wnum
        if T.Diameter(i,1)/(2*hub(j))<=0.55 && T.Diameter(i,1)/(2*hub(j))>=0.15
            for n=1:N
                L1 = (Ac*T.Power(i,1))/(1+d)^n+L1;
                L2 = Aep(i,j)/(1+d)^n + L2;
                L3 = AepWeib(i,j)/(1+d)^n + L3;
            end
            if L2 ~= 0 || L3 ~=0
                LCoE(i,j) = (Ic*(1+0.15*(j-1))*T.Power(i,1)+L1)/L2;
                LCoEWeib(i,j) = (Ic*(1+0.15*(j-1))*T.Power(i,1)+L1)/L3;
                L1 = zeros(1);
                L2 = zeros(1);
                L3 = zeros(1);
            end
        else
            LCoE(i,j) = nan;
            LCoEWeib(i,j) = nan;
        end
    end
end

[LCoEM,LCoEMP]=min(LCoE,[],'omitnan'); %Παραγωγή και θέσεις αποδοτικότερων ανεμογεννητριών με βάση το σταθμισμένο κόστος παραγωγής ενέργειας
[LCoEWeibM,LCoEWeibMp]=min(LCoEWeib,[],'omitnan'); %Παραγωγή και θέσεις αποδοτικότερων ανεμογεννητριών με την Weibull με βάση το σταθμισμένο κόστος παραγωγής ενέργειας
%%
```

$$LCoE = \frac{C_0 + \sum_{n=1}^N C_n / (1 + d)^n}{\sum_{n=1}^N Q_n / (1 + d)^n}$$

Όπου

LCoE = Σταθμισμένο κόστος παραγωγής ενέργειας (Levelized Cost of Energy) (€/kW)

C<sub>0</sub> = Το αρχικό κόστος επένδυσης, που κυμαίνεται στα περίπου 1.473 €/kW [14]. Στο οποίο θα προσθέτουμε μία τιμή του 15% ανά 10 μέτρα ύψους λόγω των αυξημένων απαιτήσεων του πύργου της ανεμογεννήτριας.

$C_n$  = Το κόστος λειτουργίας τον χρόνο  $C_n$ , για το οποίο παίρνουμε την μέση ευρωπαϊκή τιμή στο τέλος του 2019 που είναι 42 €/kW/έτος [14].

$N$  = Τα έτη της επενδυτικής περιόδου, όπου υποθέτουμε ένα 20ετές πλάνο.

$Q_n$  = Η παραγωγή ενέργειας τον χρόνο  $n$ , η οποία για λόγους απλούστευσης θα μείνει σταθερό και ίσο με AEP.

$d$  = Το ποσοστό έκπτωσης του έργου, όπου στις περισσότερες περιπτώσεις ερευνών και τεχνολογιών είναι 10%

Και τέλος, ακολουθεί ο κώδικας για την υλοποίηση των σχεδιαγραμμάτων που θα χρησιμοποιήσουμε για να καταλήξουμε στην λύση.

```
%Δημιουργία Γραφημάτων τα οποία θα μας δείχνουν την καλύτερη ανεμογεννήτρια
%στα διάφορα ύψη 10,20,30,40μ

%%
str = string(hub(:)) + 'm height';
figure('Name','Annual Energy Production','NumberTitle','off','pos',[10 10 1034 778])
subplot('position',[0.05 0.6 0.95 0.35])
bar(Aep,'DisplayName','Aep')
hold
plot(AepMp,AepM,'r*','LineWidth',1)
title('Data Method')
ylabel('kWh')
xticklabels({})
legend(str,'Location','eastoutside')
legend('boxoff')

subplot(2,1,2,'pos',[0.05 0.2 0.95 0.35])
bar(AepWeib,'DisplayName','Aep')
hold
plot(AepWeibMp,AepWeibM,'r*','LineWidth',1)
title('Weibull Distribution Method')
ylabel('kWh')
xticks(1:35)
xticklabels(string(T.Name(:,1)))
xtickangle(60)
set(gca,'XTickLabel',get(gca,'XTickLabel'),'FontSize',7)
legend(str,'Location','eastoutside')
legend('boxoff')
```

```

figure('Name','Capacity Factor','NumberTitle','off','pos',[10 10 1034 778])
subplot('position',[0.05 0.6 0.95 0.35])
bar(Cf,'DisplayName','Cf')
hold
plot(CfMp,CfM,'r*','LineWidth',1)
title('Data Method')
ylabel('%')
xticklabels([])
legend(str,'Location','eastoutside')
legend('boxoff')

subplot(2,1,2,'pos',[0.05 0.2 0.95 0.35])
bar(CfWeib,'DisplayName','Cf')
hold
plot(CfWeibMp,CfWeibM,'r*','LineWidth',1)
title('Weibull Distribution Method')
ylabel('%')
xticks(1:35)
xticklabels(string(T.Name(:,1)))
xtickangle(60)
set(gca,'XTickLabel',get(gca,'XTickLabel'),'FontSize',7)
legend(str,'Location','eastoutside')
legend('boxoff')

figure('Name','Localized Cost of Energy','NumberTitle','off','pos',[10 10 1034 778])
subplot('position',[0.05 0.6 0.95 0.35])
bar(LCoE,'DisplayName','LCoE')
hold
plot(LCoEMp,LCoEM,'r*','LineWidth',1)
title('Data Method')
ylabel('€/kW')
xticklabels([])
legend(str,'Location','eastoutside')
legend('boxoff')

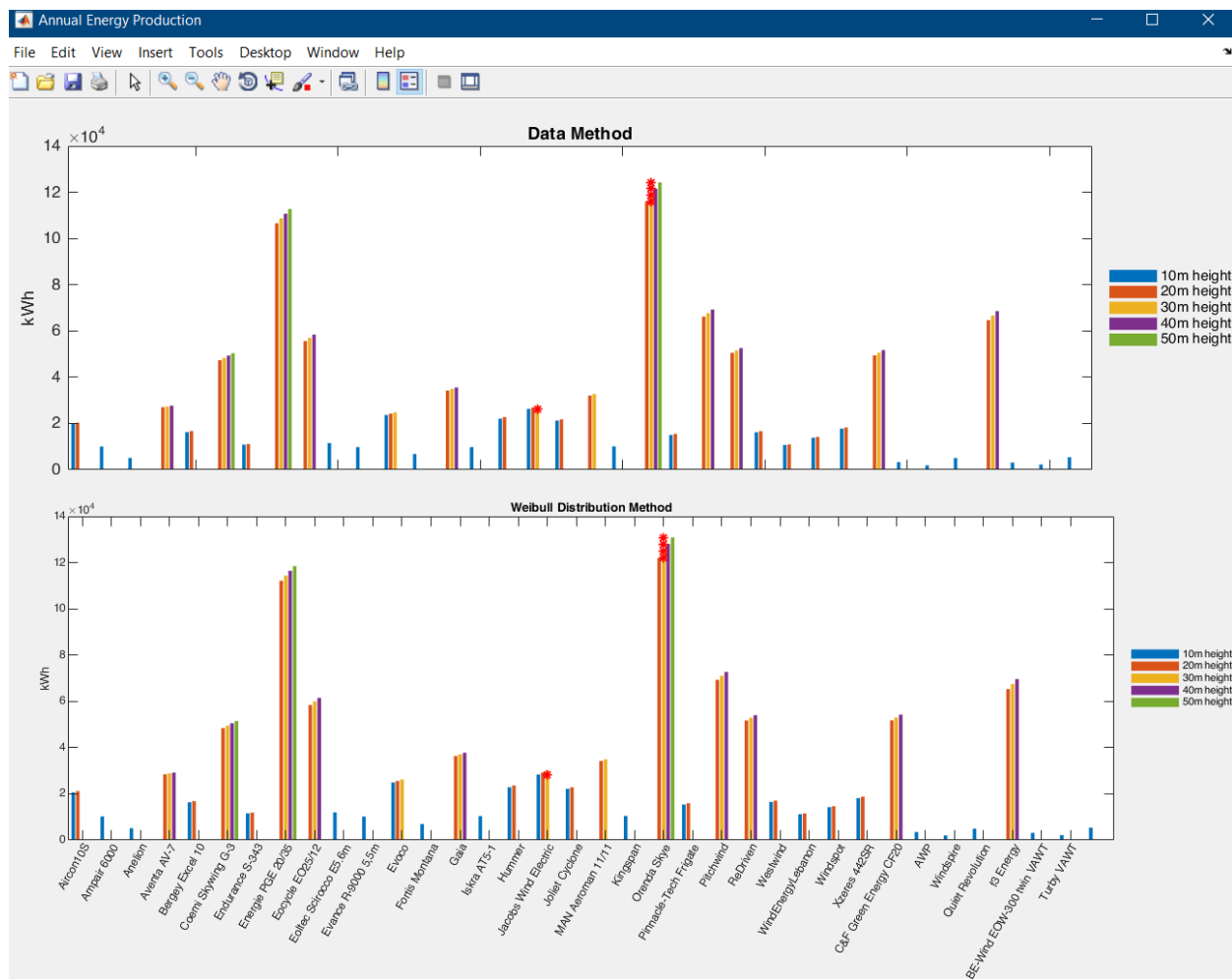
subplot(2,1,2,'pos',[0.05 0.2 0.95 0.35])
bar(LCoEWeib,'DisplayName','LCoE')
hold
plot(LCoEWeibMp,LCoEWeibM,'r*','LineWidth',1)
title('Weibull Distribution Method')
ylabel('€/kW')
xticks(1:35)
xticklabels(string(T.Name(:,1)))
xtickangle(60)
set(gca,'XTickLabel',get(gca,'XTickLabel'),'FontSize',7)
legend(str,'Location','eastoutside')
legend('boxoff')

```

## 2.1.2 Τα αποτελέσματα

Μετά από κάποια λεπτά υπολογισμών, εμφανίζονται τα σχεδιαγράμματα με τις τιμές Ετήσιας Παραγωγής Ενέργειας, του συντελεστής αποδοτικότητας και του σταθμισμένου κόστους παραγωγής ενέργειας, στα οποία έχουν σημειωθεί με κόκκινες βούλες οι βέλτιστες επιλογές:

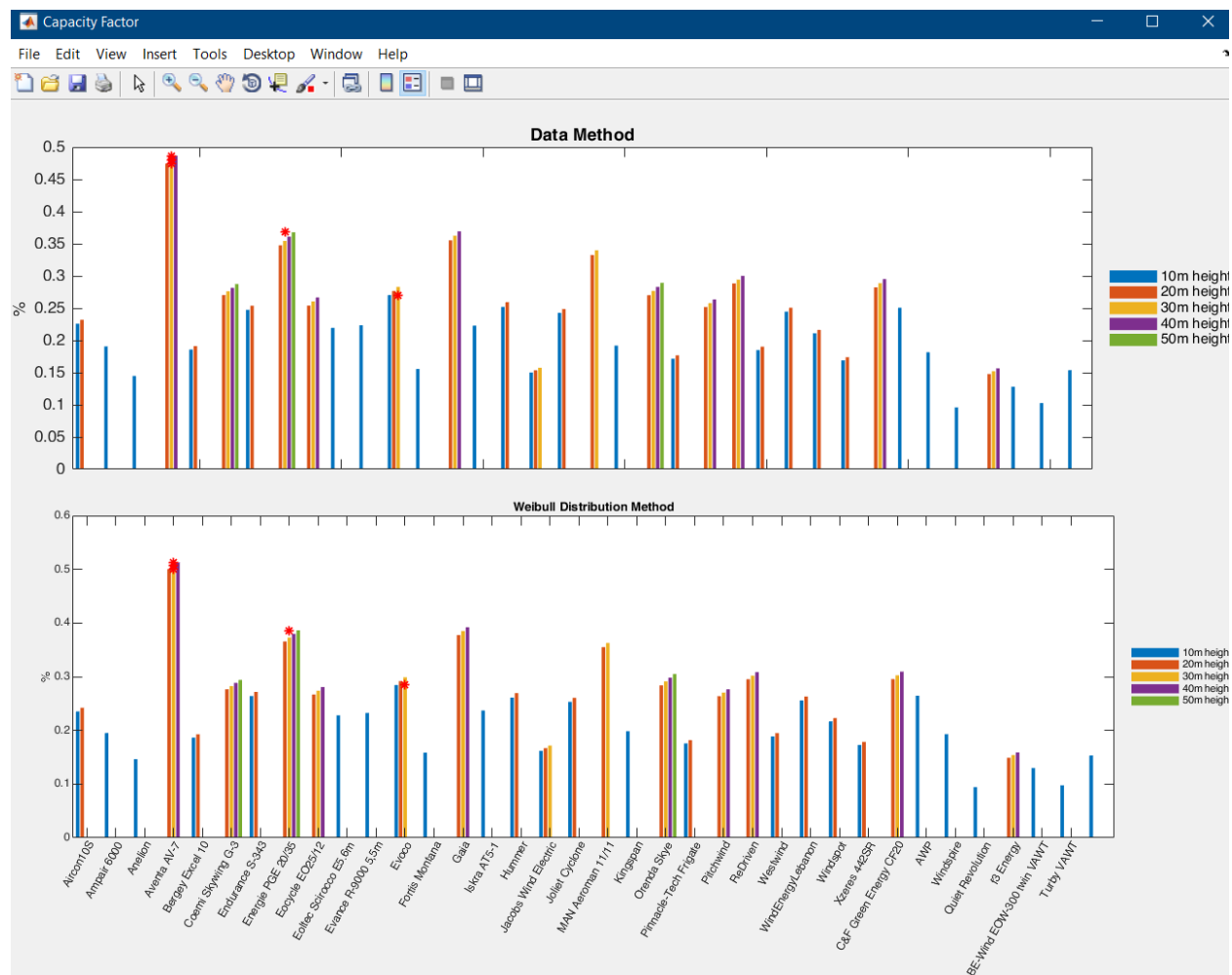




Εικόνα 22: Ετήσια Παραγωγή Ενέργειας

Στον παρακάτω πίνακα, φαίνονται οι βέλτιστες τιμές για τα αντίστοιχα ύψη:

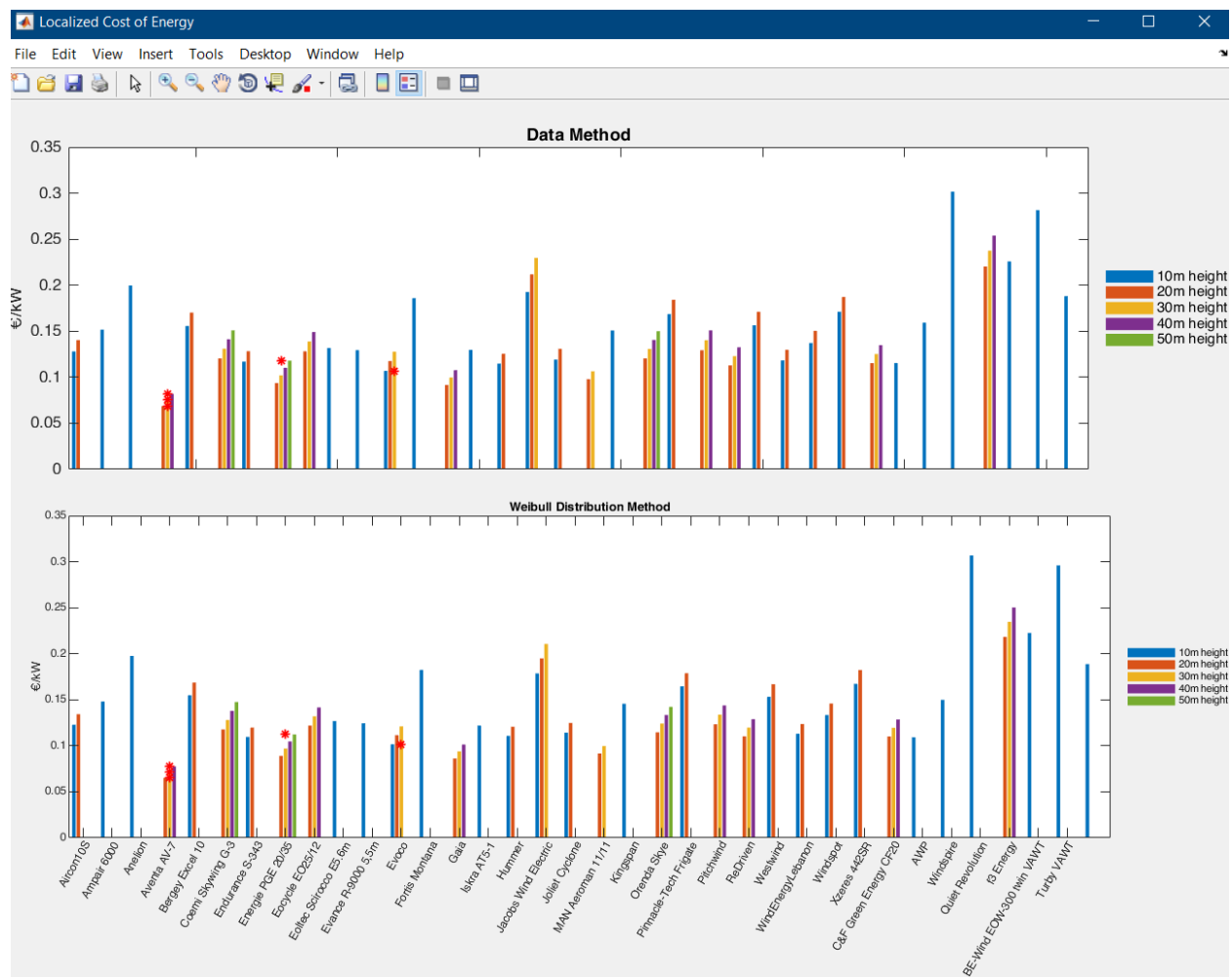
Ύψος (μ)	Απλή μέθοδος (kW)	Weibull (kW)	Όνομα Ανεμογεννήτριας
10	26.316	28.383	Jacobs Wind Electric
20	115.950	121.900	Orenda Skye
30	118.800	125.050	Orenda Skye
40	121.520	128.040	Orenda Skye
50	124.230	130.910	Orenda Skye



Εικόνα 23: Συντελεστής αποδοτικότητας

Στον παρακάτω πίνακα, φαίνονται οι βέλτιστες τιμές για τα αντίστοιχα ύψη:

Ύψος (μ)	Απλή μέθοδος (%)	Weibull (%)	Όνομα Ανεμογεννήτριας
10	27,04	28,46	Evoco
20	47,44	50,02	Aventa AV-7
30	48,08	50,68	Aventa AV-7
40	48,66	51,30	Aventa AV-7
50	41,41	43,94	Energie PGE 20/35



Εικόνα 24: Σταθμισμένο κόστος παραγωγής ενέργειας.

Στον παρακάτω πίνακα, φαίνονται οι βέλτιστες τιμές για τα αντίστοιχα ύψη:

Ύψος (μ)	Απλή μέθοδος (€/kW)	Weibull (€/kW)	Όνομα Ανεμογεννήτριας
10	0,1070	0,1017	Evoco
20	0,0686	0,0651	Aventa AV-7
30	0,0752	0,0714	Aventa AV-7
40	0,0818	0,0776	Aventa AV-7
50	0,1048	0,0988	Energie PGE 20/35

Εν τέλει, βάσει όλων το κριτηρίων μας στον παραπάνω πίνακα αναφέρονται οι καλύτερες επιλογές στα διάφορα ύψη των ανεμογεννητριών. Η τιμή πώλησης του ρεύματος από αιολικές πηγές μικρότερες των 50kW βρίσκεται στα 250€/MWh [15].

Οι ανεμογεννήτριες, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν, είναι πολύ μικρής κλίμακας για αυτό και έχουν αυξημένα έξοδα εγκατάστασης ανά παραγόμενη KWh. Στην κατηγορία αυτή, η τιμή βάσης ορίζεται τα 4001,54 €/KW σαν αρχικό κόστος επένδυσης και αυξάνεται αυτή η τιμή κατά 10% ανά 10μ. πάνω από το ελάχιστο ύψος κατασκευής της κάθε ανεμογεννήτριας. Έτσι, έχουμε τον παρακάτω πίνακα σχετικά με την διάρκεια απόσβεσης:

Ύψος (μ)	Όνομα Ανεμογεννήτριας	Τιμή βάσης αρχικού κόστους (€/KW)	Ονομαστική Ισχύς (KW)	Εκτιμώμενη τιμή άνευ έκπτωσης (€)	Κόστη Λειτουργίας και Συντήρησης (€/Έτος)	Παρηγμένη Ισχύς(KWh)	Χρονική διάρκεια περιόδου απόσβεσης(έτη)
10	Evoco	4,001.54 €	10	40,015.38	412.00	23687.04	7.31
20	Aventa AV-7	4,001.54 €	6.5	26,010.00	268.00	27012.34	4.01
30	Aventa AV-7	4,401.69 €	6.5	28,611.00	294.80	27376.75	4.35
40	Aventa AV-7	4,841.86 €	6.5	31,472.10	324.28	27707	4.73
50	Energie PGE 20/25	5,326.05 €	25	133,151.18	1,030.00	90694.98	6.19

## 2.2 Χρηματοοικονομική μελέτη

### 2.2.1 Η εφαρμογή Retscreen

Η εφαρμογή Retscreen είναι μία ημί-δωρεάν πλατφόρμα κατασκευασμένη από την κυβέρνηση του Καναδά με σκοπό την ολοκληρωμένη αναγνώριση, αξιολόγηση και βελτιστοποίηση της τεχνικής και οικονομικής βιωσιμότητας δυνητικών έργων ανανεώσιμης ενέργειας και ενεργειακής απόδοσης, καθώς επίσης και τη μέτρηση και επαλήθευση της πραγματικής απόδοσης των εγκαταστάσεων και την αναγνώριση των ευκαιριών εξοικονόμησης/παραγωγής ενέργειας [16].

### 2.2.2: Ανάλυση χρηματοοικονομικών στοιχείων

Στην συνέχεια, θα παρουσιαστούν συνοπτικά τα αποτελέσματα της μελέτης σε μορφή πίνακα πάνω στις βέλτιστες ανεμογεννήτριες. Ως κοινές σταθερές πχ η τιμή πίστωσης μείωσης των εκπομπών ΑΤΘ, χρησιμοποιήθηκαν οι κοινότερες τιμές τις αγοράς.

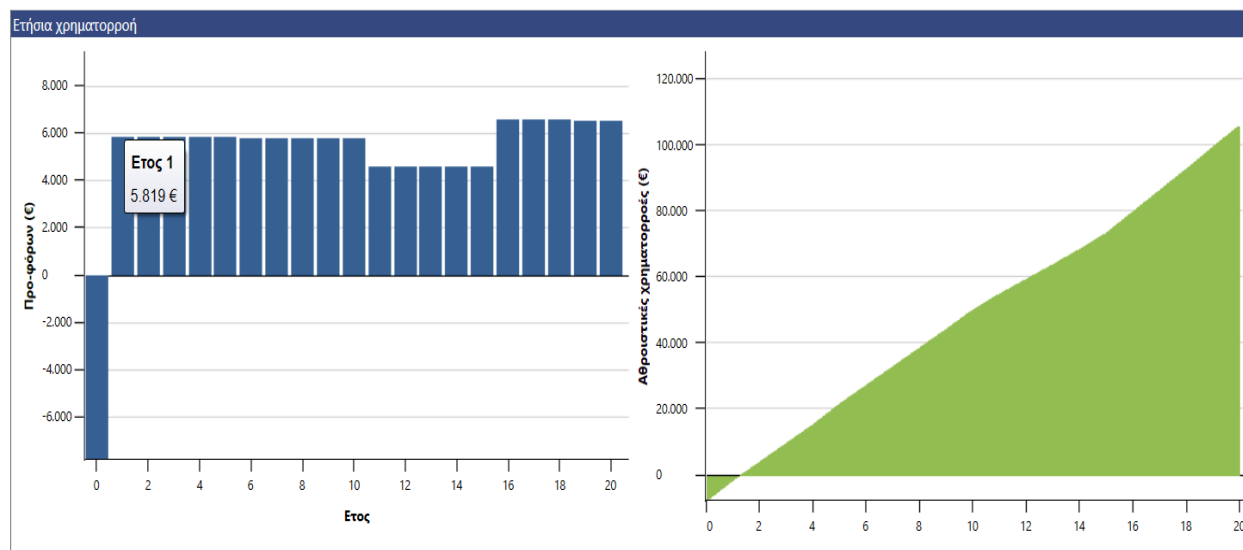
Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής πάνω στις βέλτιστες ανεμογεννήτριες, όπου:

- ΑΤΘ: Αέρια του Θερμοκηπίου
- IRR: Εσωτερικός ρυθμός αποπληρωμής
- MIRR: Μεταβλημένος εσωτερικός ρυθμός αποπληρωμής

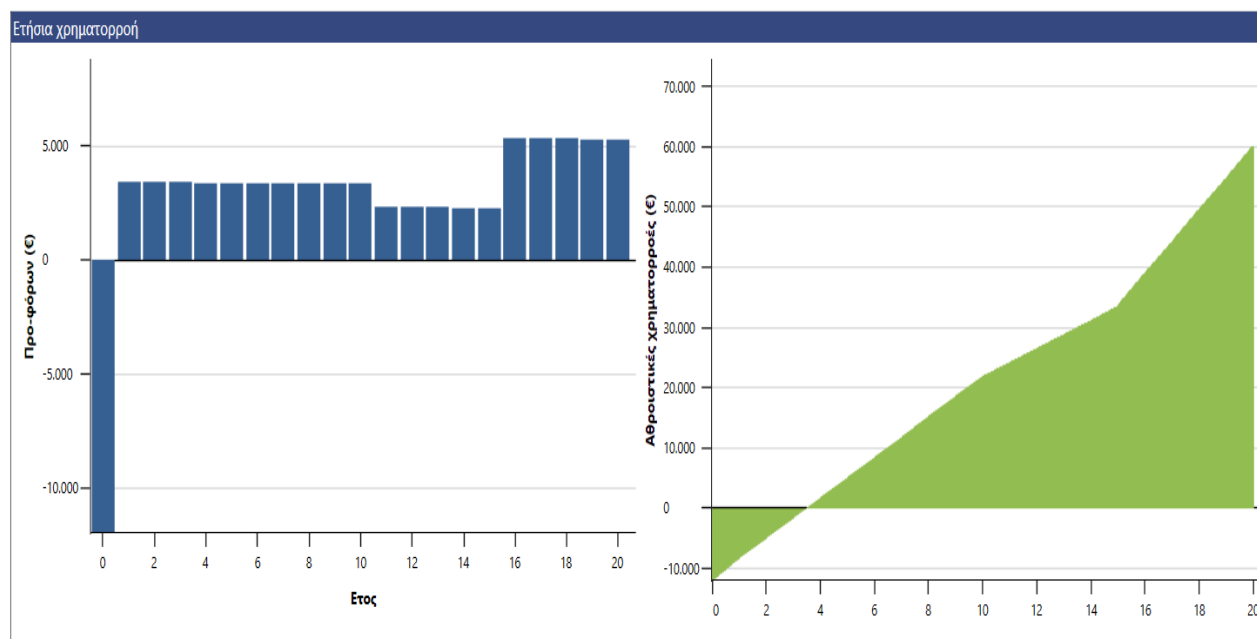
Ανεμογεννήτριες	Aventa AV-7	Evoco	Energie PGE 20/25
Γενικά στοιχεία			
Ισχύς	6.5 KW	10 KW	25 KW
Συντελεστής Ισχύος	47,44%	27,05 %	41,41%
Κόστος Κατασκευής	26,010.00 €	40.015,4 €	100,038.00 €
Κόστος Λειτουργίας και Συντήρησης	268 €/Ετος	412 €/Ετος	1030 €/Ετος
Απλή αποπληρωμή	3.9 Έτη	4.7 Έτη	10.1 Έτη
Μείωση Εκπομπών ΑΤΘ			
Μείωση Εκπομπών ΑΤΘ	19,5 tn CO <sub>2</sub>	17,1 tn CO <sub>2</sub>	31,5 tn CO <sub>2</sub>
Ισοδύναμα στρέμματα δάσους	4,5	3,9	7,2
Οικονομικοί Παράμετροι			
Τιμή πληθωρισμού	2 %		
Επιτόκιο αναγωγής	9%		
Ποσοστό επανεπένδυσης	9%		
Διάρκεια ζωής έργου	20 Έτη		
Κίνητρα και επιχορηγήσεις	-		
Τοκοχρεολύσιο	70 %		
Χρέος	18.207 €	28.011 €	70.027 €
Μετοχή	7.803 €	12.005 €	30.012 €
Επιτόκιο δανεισμού	7 %		
Περίοδος χρέους	15 Έτη		
Πληρωμές χρέους	1.999 €	3.075 €	7.689 €
Ετήσια Έσοδα – Ηλεκτρική ενέργεια			
Ηλεκτρική ενέργεια	27.7 MW	24 MW	44 MW
Τιμή πωλούμενου ηλεκτρισμού	250 €/MWh		
Έσοδα από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας	6,753.00 €	5.924,00 €	10,950.00 €
Κυλιόμενος φόρος πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας	2 %		
Ετήσια Έσοδα – Μείωση Εκπομπών ΑΤΘ			
Καθαρή ετήσια μείωση εκπομπών ΑΤΘ	19,5 tn CO <sub>2</sub>	17 tn CO <sub>2</sub>	30,9 tn CO <sub>2</sub>
Καθαρή ετήσια μείωση εκπομπών ΑΤΘ 20 έτη	381 tn CO <sub>2</sub>	335 tn CO <sub>2</sub>	618 tn CO <sub>2</sub>
Τιμή πίστωσης μείωσης εκπομπών ΑΤΘ	60,05 €/tn CO <sub>2</sub>		

Έσοδα από τη μείωση εκπομπών ΑΤΘ	1.145 €	1004 €	1.857 €
Καθαρή ετήσια μείωση εκπομπών ΑΤΘ 10 έτη	191 tn CO <sub>2</sub>	167 tn CO <sub>2</sub>	309 tn CO <sub>2</sub>
Κυλιόμενος φόρος πίστωσης μείωσης εκπομπών ΑΤΘ	0 %		
Κόστος – Αποταμιεύσεις - έσοδα			
Αρχικό Κόστος Κατασκευής	26,010.00 €	40.015,00 €	100,038.00 €
Κόστος Λειτουργίας και Συντήρησης	268 €/Ετος	412 €/Ετος	1030 €/Ετος
Πληρωμές Χρέους 15 Έτη	1.999 €	3.075 €	7689 €
Συνολικά ετήσια κόστη	2.267 €	2.232 €	8718 €
Έσοδα πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας	6.753 €	5.924 €	10.950 €
Έσοδα μείωσης εκπομπών ΑΤΘ 10 Έτη	1.145 €	1.004 €	1.857 €
Συνολικές ετήσιες αποταμιεύσεις και έσοδα	7.898 €	6.928 €	12.807 €
Καθαρή ετήσια ταμειακή ροή Έτος 1	5.631 €	3.441 €	4.088 €
IRR προ φόρου - μετοχές	71,9 %	27,9 %	17,4 %
MIRR προ φόρου - μετοχές	19,6 %	14,4 %	12,5 %
IRR προ φόρου – περιουσιακά στοιχεία	20,8 %	6 %	3,3 %
MIRR προ φόρου – περιουσιακά στοιχεία	12,6 %	7,7 %	5,9 %
Απλή αποπληρωμή	3,4 έτη	6,1 έτη	8,5 έτη
Αποπληρωμή Μετοχών	1,4 έτη	3,5 έτη	6,2 έτη
Καθαρή Παρούσα Αξία	42.210 €	19.317 €	26.153 €
Ετήσιες αποταμιεύσεις κύκλου ζωής	4.624 €/έτος	2.116 €/έτος	2.865 €/έτος
Αναλογία Οφέλους-Κόστους	6,4	2,6	1,9
Κάλυψη δανειακών υποχρεώσεων	3,8	2,1	1,6
Κόστος μείωσης εκπομπών ΑΤΘ	-243 €/tn CO <sub>2</sub>	-127 €/tn CO <sub>2</sub>	-92,67 €/tn CO <sub>2</sub>
Κόστος παραγωγής ενέργειας	109 €/MWh	191 €/MWh	258 €/MWh

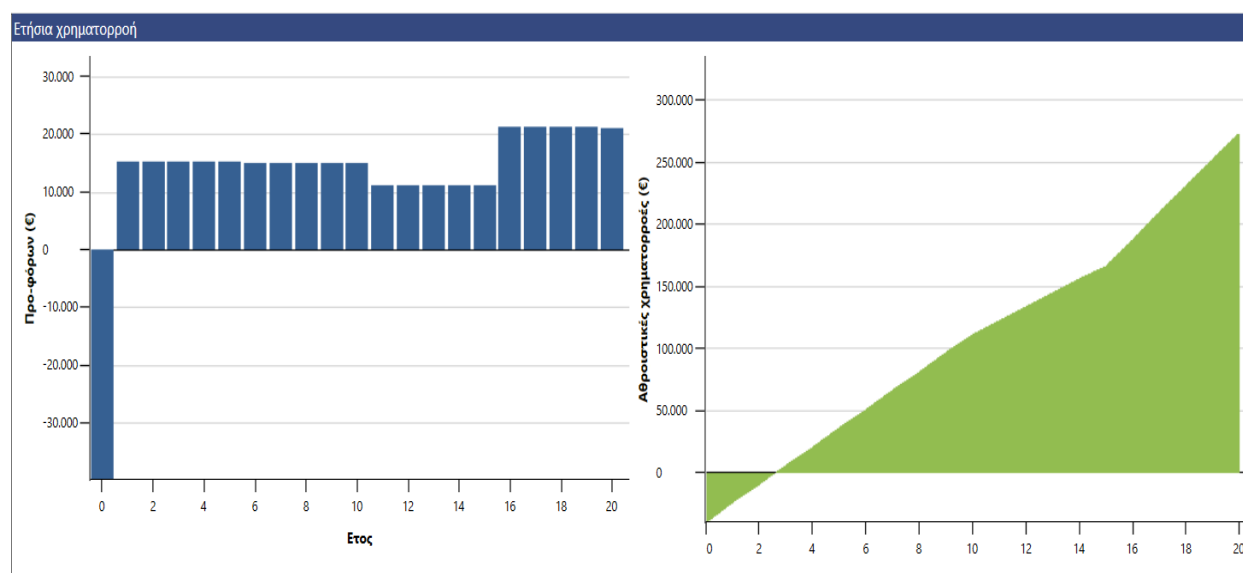
Παρακάτω φαίνονται, σχηματικά, οι ετήσιες χρηματοροές για τις επιλεγμένες ανεμογεννήτριες.



Εικόνα 25: Χρηματοροή Aventa



Εικόνα 26:Χρηματοροή Enovo



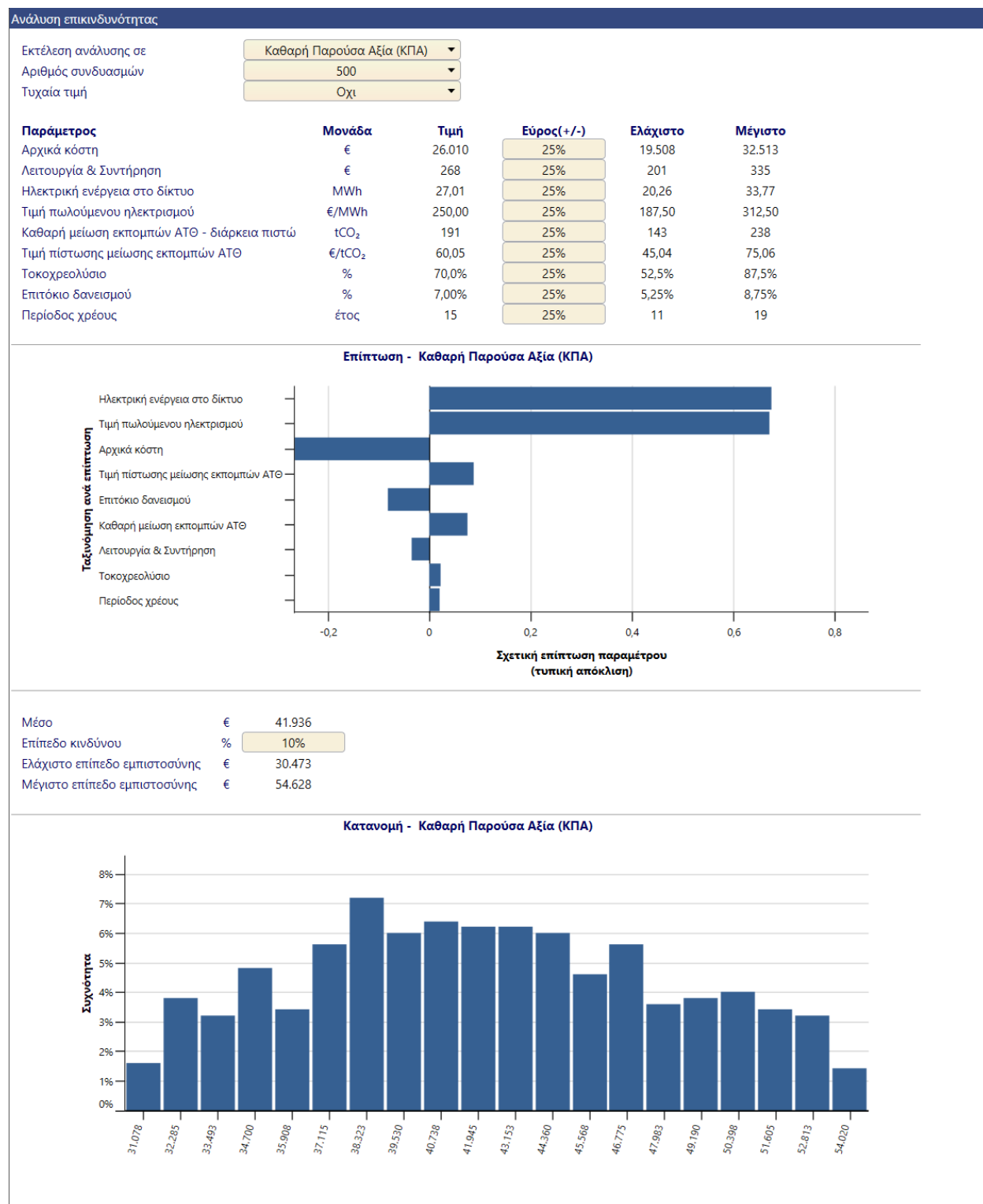
Εικόνα 27:Χρηματοροή Energie

### 2.2.3: Ανάλυση Κινδύνου

Λόγω του πλήθους των συστημάτων από τα οποία εξαρτάται μία επένδυση, η βιωσιμότητά της μπορεί να διαφέρει αρκετά από το αρχικό προμελετημένο σχέδιο. Στην περίπτωση των ανεμογεννητριών, ακόμα και η κλιματική αλλαγή σε βάθος 20ετίας μπορεί να μειώσει το κέρδος της επένδυσης σε τέτοιο σημείο ώστε να κριθεί ασύμφορη. Εν τέλει, για την αποφυγή αυτών, καταφεύγουμε στην λεγόμενη ανάλυση ευαισθησίας.



Παρακάτω, με την χρήση του Retscreen, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις επιλεγμένες ανεμογεννήτριες.



Εικόνα 28: Ανάλυση επικινδυνότητας Aventa

## Ανάλυση επικινδυνότητας

Εκτέλεση ανάλυσης σε

Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ)

Αριθμός συνδυασμών

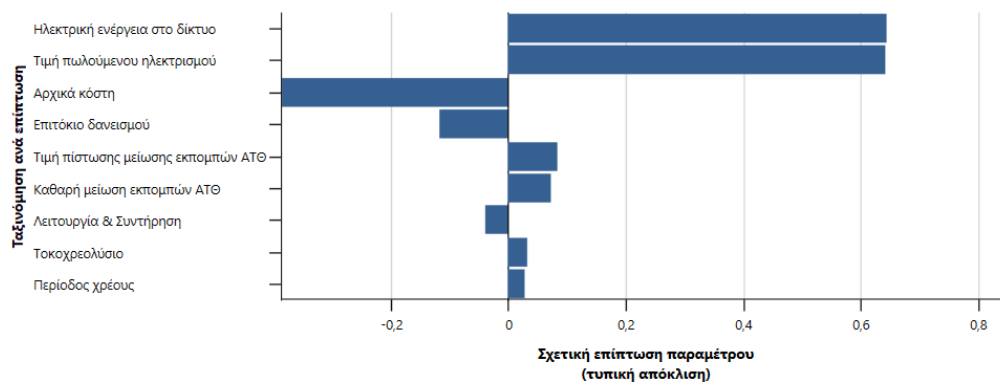
500

Τυχασία τιμή

Όχι

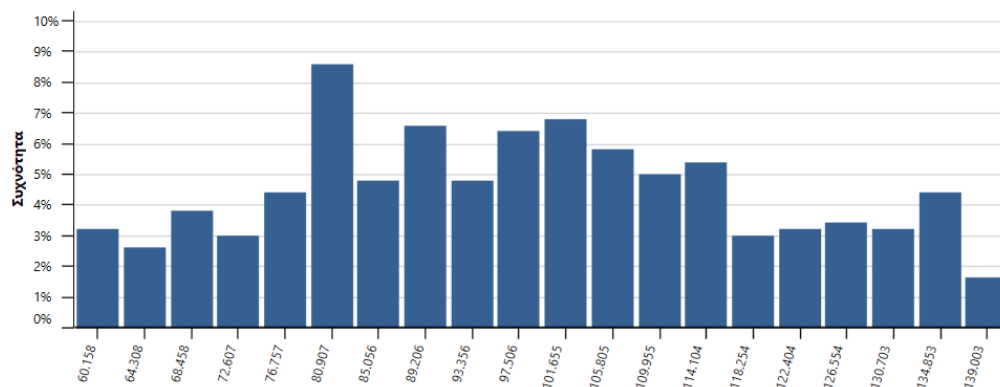
Παράμετρος	Μονάδα	Τιμή	Εύρος(+/-)	Ελάχιστο	Μέγιστο
Αρχικά κόστη	€	133.151	25%	99.863	166.439
Λειτουργία & Συντήρηση	€	1.030	25%	772	1.287
Ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο	MWh	90,69	25%	68,02	113,36
Τιμή πωλούμενου ηλεκτρισμού	€/MWh	250,00	25%	187,50	312,50
Καθαρή μείωση εκπομπών ΑΤΘ - διάρκεια πιστώ	tCO <sub>2</sub>	640	25%	480	800
Τιμή πίστωσης μείωσης εκπομπών ΑΤΘ	€/tCO <sub>2</sub>	60,05	25%	45,04	75,06
Τοκοχρεολύσιο	%	70,0%	25%	52,5%	87,5%
Επιτόκιο δανεισμού	%	7,00%	25%	5,25%	8,75%
Περίοδος χρέους	έτος	15	25%	11	19

### Επίπτωση - Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ)



Μέσο	€	97.265
Επίπεδο κινδύνου	%	10%
Ελάχιστο επίπεδο εμπιστοσύνης	€	58.079
Μέγιστο επίπεδο εμπιστοσύνης	€	141.131

### Κατανομή - Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ)



Εικόνα 29: Ανάλυση επικινδυνότητας Energie

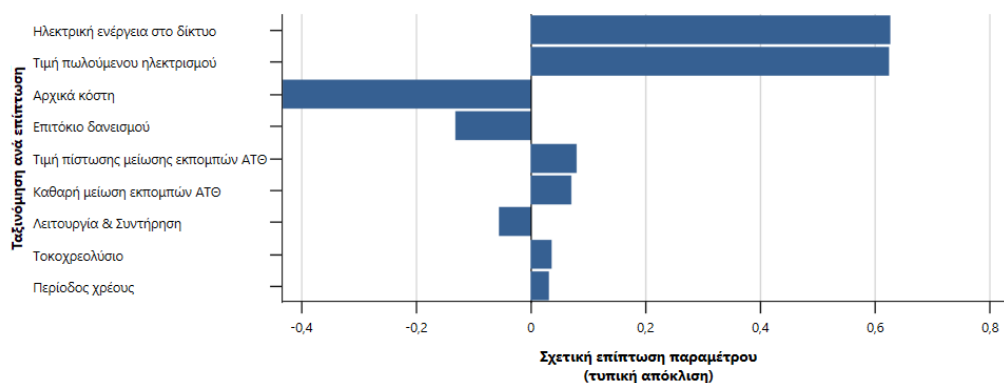
## Ανάλυση επικινδυνότητας

Εκτέλεση ανάλυσης σε  
Αριθμός συνδυασμών  
Τυχαία τιμή

Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ)  
500  
Οχι

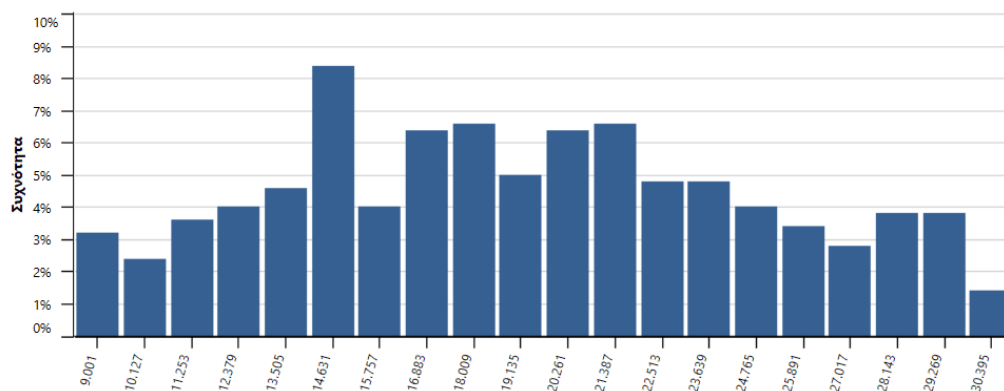
Παράμετρος	Μονάδα	Τιμή	Εύρος(+/-)	Ελάχιστο	Μέγιστο
Αρχικά κόστη	€	40.015	25%	30.012	50.019
Λειτουργία & Συντήρηση	€	412	25%	309	515
Ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο	MWh	23,70	25%	17,77	29,62
Τιμή πωλούμενου ηλεκτρισμού	€/MWh	250,00	25%	187,50	312,50
Καθαρή μείωση εκπομπών ΑΤΘ - διάρκεια πιστώ	tCO <sub>2</sub>	167	25%	125	209
Τιμή πίστωσης μείωσης εκπομπών ΑΤΘ	€/tCO <sub>2</sub>	60,05	25%	45,04	75,06
Τοκοχρεολύσιο	%	70,0%	25%	52,5%	87,5%
Επιτόκιο δανεισμού	%	7,00%	25%	5,25%	8,75%
Περίοδος χρέους	έτος	15	25%	11	19

### Επίπτωση - Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ)



Μέσο	€	19.136
Επίπεδο κινδύνου	%	10%
Ελάχιστο επίπεδο εμπιστοσύνης	€	8.436
Μέγιστο επίπεδο εμπιστοσύνης	€	30.959

### Κατανομή - Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ)



Εικόνα 30:Ανάλυση επικινδυνότητας Ενoco

## Σχολιασμός αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Ξεκινώντας, φαίνεται ότι, αναμενόμενα, οι ανεμογεννήτριες με την μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ ήταν αυτές που παρήγαγαν την περισσότερη ενέργεια, συγκεκριμένα αυτή της Jacobs-Wind Electric των 20KW και η Orenda Skye των 50KW.

Εν συνεχεία, παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα του συντελεστή αποδοτικότητας και του σταθμισμένου κόστους ενέργειας συμβαδίζουν με τις μέσες πραγματικές ευρωπαϊκές τιμές. Ο λόγος αυτού, είναι η χρήση των μέσων τιμών κατασκευής και συντήρησης σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Η πραγματικότητα ίσως να διαφέρει, καθώς οι διάφοροι κατασκευαστές έχουν άλλα επίπεδα τιμών και πολλές φορές παρέχουν εκπτώσεις ανάλογα με το μέγεθος του έργου. Ωστόσο, κανένα εκ των αποτελεσμάτων δεν φέρει παράλογη τιμή. Είτε ο συντελεστής αποδοτικότητας είτε το σταθμισμένο κόστος παραγωγής ενέργειας φέρουν τιμές εντός των μέσων στις διάφορες χώρες (εικόνες 17 και 18).

Η χρηματοοικονομική ανάλυση αναδεικνύει την Aventa AV-7 ως την αποδοτικότερη, έχοντας τον μικρότερο χρόνο απόσβεσης και την καλύτερη αναλογία επένδυσης/κέρδους σε βάθος χρόνου. Η Energie PGE 20/25 ήταν αυτή με το μεγαλύτερο τελικό κέρδος στις 272.000€ στο βάθος της 20ετίας.

Η κατασκευή μιας ανεμογεννήτριας στην περιοχή της Πολυτεχνειούπολης θα ήταν μια αξιόλογη επένδυση. Συνδυάζοντάς την με φωτοβολταϊκά και ίσως αναθέτοντας κομμάτι της κατασκευής της σε φοιτητές και μεταπτυχιακούς, θα μπορούσε να προσφέρει πολλά, τόσο από οικονομικής όσο και από εκπαιδευτικής άποψης, ενώ παράλληλα θα ήταν ένα καλό βήμα για ένα πιο πράσινο Πολυτεχνείο.

Εν τέλει, Η κατασκευή μίας ανεμογεννήτριας ή και ενός αιολικού πάρκου δεν είναι εύκολη υπόθεση. Οι παράγοντες και τα κριτήρια που χρειάζονται να υπολογιστούν για να βγει σωστό πόρισμα για την επένδυσή, χρειάζονται μακροχρόνια μελέτη για την σωστή απόφαση. Τα δεδομένα σε αυτήν την μελέτη ήταν ενός χρόνου από ένα σημείο, σε μεγάλα αιολικά πάρκα χρειάζεται αυτή η διαδικασία της δειγματοληψίας να γίνει για τουλάχιστον 2 χρόνια σε πολλαπλά σημεία για να αποφασιστεί πού, πόσες και αν θα εγκατασταθούν ανεμογεννήτριες. Επίσης, καθώς ήταν αδύνατο να βρεθούν, χρησιμοποιήσαμε τις μέσες ευρωπαϊκές τιμές για τα κόστη. Παρόλα αυτά, ευτυχώς, με τις τεχνολογικές εξελίξεις και την αύξηση της ζήτησης για καθαρή ενέργεια, ο τομέας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μοιάζει για όλο και πιο συμφέρον τομέας επενδύσεων.

## Παράρτημα: Λίστα ανεμογεννητριών

Name	Type	Power	Diameter	Cut-out	Cut-in
Aircon10S	1	10.0 kW	7.1	25	3.5
Ampair 6000	1	6.0 kW	5.5	20	3.5
Anelion	1	4.0 kW	3.5	20	3
Aventa AV-7	1	6.5 kW	12.9	14	2
Bergey BWC Excel 10	1	10.0 kW	7	25	2.5
Coemi Skywing G-3	1	20.0 kW	15	20	3
Endurance S-343	1	6.4 kW	6.4	24	4
Energie PGE 20/25	1	25.0 kW	20	16	3
Eocycle EO25/12	1	25.0 kW	12.6	25	3
Eoltec Scirocco E5.6m	1	6.0 kW	5.6	25	2.5
Evance R-9000 5,5m	1	5.0 kW	5.5	30	3
Evoco	1	10.0 kW	9.7	30	2.5
Fortis Montana	1	5.0 kW	5	25	2.5
Gaia	1	11.0 kW	13	22	4
Iskra AT5-1	1	5.0 kW	5.4	15	3
Hummer	1	10.0 kW	8	25	3
Jacobs Wind Electric	1	20.0 kW	9.5	14	3.5
Joliet Cyclone	1	10.0 kW	8	20	2.5
MAN Aeroman 11/11	1	11.0 kW	11.6	24	3.8
Kingspan	1	6.0 kW	5.6	30	3.5
Orenda Skye	1	49.0 kW	18.9	25	3.5
Pinnacle-Tech Frigate	1	10.0 kW	7	30	4
Pitchwind	1	30.0 kW	14	30	2
ReDriven	1	20.0 kW	12.3	18	2
Westwind	1	10.0 kW	6.4	25	2.5
WindEnergyLebanon	1	5.0 kW	6	20	3
Windspot	1	7.5 kW	6.3	20	3
Xzeres 442SR	1	12.0 kW	7.2	20	2.5
C&F Green Energy CF20	1	20.0 kW	12.8	25	2.5
AWP	1	1.5 kW	3.6	20	3
Windspire	2	1.2 kW	3.1	14	4
Quiet Revolution	2	6.0 kW	4.2	19	4
f3 Energy	2	50.0 kW	12	30	4
BE-Wind EOW-300 twin					
VAWT	2	2.8 kW	3.5	25	2
Turby VAWT	2	2.5 kW	3.6	14	3.5
UrbanGreenEnergy UGE-4k	2	4.0 kW	4	25	3.5

## Βιβλιογραφία

- [1] "Eurostat," [Online]. Available: <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/8612324/8-25012018-AP-EN.pdf/9d28caef-1961-4dd1-a901-af18f121fb2d>.
- [2] "ΑΔΜΗΕ," Ιούλιος 2020. [Online]. Available: [https://www.admie.gr/sites/default/files/attached-files/type-file/2020/08/Energy\\_Report\\_202007\\_v1\\_0.pdf](https://www.admie.gr/sites/default/files/attached-files/type-file/2020/08/Energy_Report_202007_v1_0.pdf).
- [3] ΕΛΕΤΑΕΝ, Ιούνιος 2020. [Online]. Available: <https://eletaen.gr/wp-content/uploads/2020/07/2020-7-29-hwea-statistics-s1-2020.pdf>.
- [4] "www.deddie.gr," ΔΕΔΔΗΕ, 2016. [Online]. Available: <https://www.deddie.gr/Documents2/Fotovoltaika/FV%20net%20metering/%CE%A0%CE%99%CE%9D%CE%91%CE%9A%CE%91%CE%A3%201%20-%20%CE%9A%CE%A1%CE%97%CE%A4%CE%97.pdf>.
- [5] "Stanford University," 2005. [Online]. Available: [https://web.stanford.edu/group/efmh/winds/global\\_winds.html](https://web.stanford.edu/group/efmh/winds/global_winds.html).
- [6] "CRES," [Online]. Available: <http://www.cres.gr/>.
- [7] "RAE," [Online]. Available: [www.rae.gr](http://www.rae.gr).
- [8] "Wikipedia," [Online]. Available: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/70/Wind\\_rose\\_plot.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/70/Wind_rose_plot.jpg).
- [9] "wind and weather tools," [Online]. Available: [windandweathertools.com/the-best-cup-anemometers-how-wind-cups-work/](http://windandweathertools.com/the-best-cup-anemometers-how-wind-cups-work/).
- [10] "Energy education," [Online]. Available: [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Wind\\_turbine](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Wind_turbine).
- [11] "research gate," [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Wind-power-output-with-steady-wind-speed\\_fig4\\_315743258](https://www.researchgate.net/figure/Wind-power-output-with-steady-wind-speed_fig4_315743258).
- [12] "Cyprus Energy Agency," [Online]. Available: <http://www.cea.org.cy/TOPICS/Renewable%20Energy/Small%20Wind%20Turbines%20for%20households%20-%20CEA.pdf>.
- [13] [Online]. Available: <https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fdigilib.teiemt.gr%2Fjspui%2Fbitstream%2F123456789%2F1484%2F1%2F012010049.pdf&psig=AOvVaw3bG0dBgX6t4QBIVltxvoyR&ust=1600761173791000&source=images&cd=vfe&ved=2ahUKEwiO7qua4vnrAhUK-xoKHRwRCYoQr4kDegUIARC4AQ>.
- [14] "IRENA," International Renewable Energy Agency, 2019. [Online]. Available: <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019>.
- [15] "ΝΟΜΟΣ ΥΠ' ΑΡΙΘ. 3851," Ιουνίου 2010. [Online]. Available: <http://www.ypeka.gr/Portals/0/Files/Energeia/Ananeosimes%20Phges%20Energeias/06.pdf>.

[16] "Natural Resources Canada," Government of Canada, [Online]. Available: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/tools/data-analysis-software-modelling/retscreen/7465>.