



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ & ΜΕΛΕΤΗ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ
ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΜΕ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥ 20 MW
ΣΤΟ ΑΝΤΙΡΡΙΟ**

ΝΤΑΛΑΠΕΡΑΣ ΙΩΑΝΝΗΣ 164011

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ Α: ΤΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ Β: ΚΩΣΤΟΓΛΟΥ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ**

**ΠΑΤΡΑ
ΙΟΥΝΙΟΣ, 2026**

Πίνακας Περιεχομένων

Περιεχόμενα

Πίνακας Περιεχομένων.....	1
Περιεχόμενα.....	1
Περίληψη	5
Abstract	6
Εισαγωγή	7
1.1 Ιστορική Αναδρομή	7
1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	9
1.3 Κατηγορίες ΑΠΕ.....	9
1.4 Ορισμοί και βασικά στοιχεία της αιολικής ενέργειας και των αιολικών πάρκων.....	11
1.5 Η αιολική ενέργεια στην Ελλάδα	13
Τεχνολογικός Εξοπλισμός Αιολικού Πάρκου	15
2.1 Ανεμογεννήτριες.....	15
2.2 Τεχνολογικά τμήμα – Μέρη ανεμογεννήτριας	15
2.3 Κατηγορίες ανεμογεννητριών.....	17
2.4 Διαδικασία Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας	23
2.4.1 Μηχανική Ισχύς Ανέμου	23
2.4.2 Βαθμός απόδοσης.....	24
2.4.3 Καταστάσεις Λειτουργίας.....	26
2.4.4 Κατανομή Weibull	28
2.4.5 Δείκτες Αξιολόγησης.....	31
2.4.6 Μετάδοσης Κίνησης.....	31
2.4.7 Μετατροπή σε ηλεκτρισμό.....	31
2.4.8 Ρυθμίσεις και Μετασχηματισμός	33
2.5 Τρόπος διασύνδεσης με το Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας και Βελτιστοποίηση Απόδοσης Ενέργειας.....	34
Περιβαλλοντικές επιπτώσεις αιολικών πάρκων	37
3.1 Επιπτώσεις στη Βιοποικιλότητα: Σύγχρονες Προσεγγίσεις	37
3.2 Ανάλυση Κύκλου Ζωής και Ανθρακικό Αποτύπωμα.....	37
3.3 Εκπομπές κατά την Κατασκευή.....	40
3.3.1 Αισθητική Τοπίου και Κοινωνικές Επιπτώσεις.....	40
3.4 Τεχνολογίες Μετριασμού (Mitigation Hierarchy).....	41
3.5 Οικονομική και Κοινωνική Διάσταση των Αιολικών Επενδύσεων	42

3.5.1	<i>Κοινωνικές Επιπτώσεις και Αποδοχή</i>	44
3.5.2	<i>Σύνθεση: η "Πράσινη" Εξίσωση</i>	44
3.6	<i>Θεσμικό Πλαίσιο και Στρατηγικός Σχεδιασμός Χωροθέτησης Αιολικών Σταθμών</i>	45
3.6.1	<i>Χωροταξικοί Περιορισμοί και Νομοθετικό Πλαίσιο Αιολικών Εγκαταστάσεων στην Ελλάδα σε Περιοχές βάσει Natura 2000</i>	47
3.7	<i>Βιώσιμη Ανάπτυξη και Αιολική Ενέργεια: Μια Σύνθετη Ισορροπία</i>	48
3.7.1	<i>Η Έννοια της Βιώσιμης Ανάπτυξης στις ΑΠΕ</i>	49
3.7.2	<i>Περιβαλλοντική Βιωσιμότητα: Η Αρχή της Φέρουσας Ικανότητας</i>	49
3.7.3	<i>Οικονομική Βιωσιμότητα και Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA)</i>	50
3.7.4	<i>Κοινωνική Βιωσιμότητα και Ενεργειακή Δικαιοσύνη</i>	51
3.8	<i>Στρατηγικές Βελτιστοποίησης και Κοινωνικής Ένταξης των Αιολικών Έργων</i> 52	
3.8.1	<i>Στρατηγικό Πλαίσιο Βιώσιμης Ανάπτυξης Αιολικών Έργων στην Ελλάδα</i> 52	
3.9	<i>Τρόποι Ελαχιστοποίησης Θορύβου και Οπτικής Όχλησης</i>	53
3.10	<i>Διαρκής Παρακολούθηση και Εκτίμηση Επιπτώσεων</i>	53
	<i>Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων Αιολικού Πάρκου</i>	55
4.1	<i>Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων</i>	55
4.1.1	<i>Δομή Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων</i>	56
4.2	<i>Ηλεκτρονικό Περιβαλλοντικό Μητρώο (ΗΠΜ)</i>	64
4.2.1	<i>Περιβαλλοντική Ταυτότητα</i>	64
4.3	<i>Άδεια Έγκρισης Περιβαλλοντικών Ορών (ΑΕΠΟ)</i>	65
4.4	<i>Πρότυπες Περιβαλλοντικές Δεσμεύσεις (ΠΠΔ)</i>	66
4.5	<i>Ο Εκσυγχρονισμός και οι Πρόσφατες Μεταρρυθμίσεις στο Καθεστώς της Περιβαλλοντικής Αδειοδότησης (ΑΕΠΟ) στην Ελλάδα</i>	67
	<i>Οικονομική αξιολόγηση επένδυσης αιολικού πάρκου</i>	70
5.1	<i>Ανάλυση των σταδίων εγκατάστασης αιολικού πάρκου</i>	70
5.1.1	<i>Κριτήριο Επιλογής Εδάφους & Ανάπτυξης Αιολικού Πάρκου</i>	73
5.1.2	<i>Κριτήρια Επιλογής Και Τεχνικές Προδιαγραφές Ανεμογεννήτριας</i>	79
5.1.3	<i>Χωροθέτηση και Ενεργειακός Σχεδιασμός Αιολικού Πάρκου</i>	81
5.2	<i>Κόστος Κατασκευής αιολικού πάρκου</i>	85
5.2.1	<i>Ανάλυση Οικονομικής Βιωσιμότητας και Κόστους Κατασκευής Αιολικών Πάρκων</i> 85	
5.2.2	<i>Δομή κόστους και Τεχνική Υλοποίηση Αιολικών Πάρκων Αναλυτική Κατανομή του CAPEX</i>	86
5.2.3	<i>Το Κόστος Κατασκευής CAPEX στην Ελλάδα</i>	93
5.3	<i>Κόστος συντήρησης & λειτουργίας αιολικού πάρκου</i>	94
5.3.1	<i>Μηχανική της Αξιοπιστίας και Κατανομή Weibull</i>	95

5.3.2	Συνάρτηση αξιοπιστίας $R(t)$	96
5.3.3	Στρατηγικές Συντήρησης.....	98
5.3.4	Ψηφιοποίηση και Δυναμική Διαχείριση Εντροπίας.....	99
5.3.5	Η Ελληνική Ιδιαιτερότητα στο OPEX.....	99
5.4	Μεσοσταθμικό Κόστος Κεφαλαίου (WACC)	101
5.4.1	Μαθηματικό Μοντέλο υπολογισμού του Μεσοσταθμικού Κόστους Κεφαλαίου	101
5.4.2	Παράγοντες που επηρεάζουν το Μεσοσταθμικό Κόστος Κεφαλαίου στα αιολικά πάρκα	102
5.4.3	Διαχείριση Ρίσκου και Διαφοροποίηση Μεσοσταθμικού Κόστους Κεφαλαίου	103
5.4.4	Το Μεσοσταθμικό Κόστος Κεφαλαίου στην Ελλάδα.....	104
5.5	Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας	105
5.5.1	Το Μαθηματικό Μοντέλο υπολογισμού του Σταθμισμένου Κόστους Ενέργειας.....	105
5.5.2	Τεχνικοί Παράμετροι που Επηρεάζουν το LCOE	105
5.6	Απόσβεση Αιολικού Πάρκου.....	106
5.6.1	Είδη Αποσβέσεων στα Αιολικά Πάρκα	106
5.7	Οφέλη παραγωγής.....	108
	Οικονομική Αξιολόγησης Επένδυσης Αιολικού Έργου στο Αντίρριο Αιτωλοακαρνανίας.....	111
6.1	Στοιχεία Τοποθεσίας εγκατάστασης του αιολικού Πάρκου	111
6.2	Τεχνικά Χαρακτηριστικά Ανεμογεννητριών του Πάρκου	113
6.2.1	Κλάση του ανέμου στο σημείο εγκατάστασης του αιολικού πάρκου....	117
6.2.2	Τεχνολογία της A/G Siemens Gamesa G90	118
6.3	Προδιαγραφές Θεμελίωσης των A/G	122
6.3.1	Θεμελιακή γείωση.....	124
6.4	Χωροθέτηση του Αιολικού Πάρκου.....	126
6.5	Οικονομική Αξιολόγηση Έργου	127
6.5.1	Κόστος Κατασκευής (CAPEX)	127
6.5.2	Λειτουργικό Κόστος και Κόστος Συντήρησης (OPEX)	130
6.5.3	Αναμενόμενα έσοδα της επένδυσης.....	132
6.5.4	Υπολογισμός καθαρού εσόδου της επένδυσης.....	132
6.5.5	Οικονομική αποτίμηση της επένδυσης.....	133
6.6	Θεσμικό Πλαίσιο, Περιβαλλοντική Κατάταξη και Δεσμεύσεις Έργου	135
	Συμπεράσματα	138
	Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	140
	Εικόνες.....	144

Παράρτημα.....	146
----------------	-----

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την ολοκληρωμένη τεχνοοικονομική αξιολόγηση και τη μελέτη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν από το σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία ενός χερσαίου αιολικού πάρκου ονομαστικής ισχύος 20 MW στο Αντίρριο Ναυπακτίας. Μέσα από τη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης, εξετάζεται η βιωσιμότητα των επενδύσεων σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) υπό το πρίσμα του σύγχρονου εθνικού και ευρωπαϊκού θεσμικού πλαισίου για την πράσινη μετάβαση.

Στα δύο πρώτα κεφάλαια πραγματοποιείται μια εισαγωγική ανασκόπηση των ΑΠΕ, με εξειδικευμένη έμφαση στην αιολική ενέργεια και τη δομή των αιολικών πάρκων, ενώ παράλληλα αναλύεται διεξοδικά ο απαιτούμενος τεχνολογικός εξοπλισμός των σύγχρονων ανεμογεννητριών. Το τρίτο κεφάλαιο εστιάζει στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των αιολικών εγκαταστάσεων, προτείνοντας ταυτόχρονα μεθόδους βελτιστοποίησης με στόχο τον περιορισμό των επιδράσεων και την ενίσχυση της οικολογικής προστασίας.

Στη συνέχεια, στο τέταρτο και πέμπτο κεφάλαιο αναπτύσσεται το θεωρητικό και πρακτικό πλαίσιο της οικονομικής αξιολόγησης. Γίνεται εκτενής αναφορά στις κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX), τα λειτουργικά έξοδα (OPEX) και τις μεθόδους απόσβεσης, στοιχεία τα οποία εφαρμόζονται ακολούθως για τη χρηματοοικονομική αποτίμηση του υπό εξέταση έργου. Το έκτο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στη Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ), προσφέροντας μια αναλυτική παρουσίαση της δομής της, του εφαρμοστέου νομοθετικού πλαισίου, καθώς και των πρόσφατων μεταρρυθμίσεων που διέπουν το καθεστώς περιβαλλοντικής αδειοδότησης στην Ελλάδα.

Η εργασία ολοκληρώνεται με τη διατύπωση τεκμηριωμένων προτάσεων για τεχνολογικές και περιβαλλοντικές αναβαθμίσεις, τη βελτιστοποίηση του χωροταξικού σχεδιασμού, την ενίσχυση της κοινωνικής αποδοχής και την ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (ESS), συμβάλλοντας έτσι στην προώθηση της αειφορίας και στην ενεργό συμμετοχή της τοπικής κοινότητας.

Λέξεις-κλειδιά: Αιολική Ενέργεια, Τεχνοοικονομική Αξιολόγηση, Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων

Abstract

This diploma thesis presents an integrated techno-economic evaluation and environmental impact assessment regarding the design, construction, and operation of an onshore wind farm with a nominal capacity of 20 MW in Antirrio, Nafpaktia. Through this specific case study, the viability of investments in Renewable Energy Sources (RES) is examined under the scope of the contemporary national and European regulatory framework for the green transition.

The first two chapters provide an introductory overview of RES, focusing specifically on wind energy and the configuration of wind farms, while thoroughly analyzing the technical equipment required for modern wind turbines. The third chapter focuses on the environmental impacts of wind power installations, while concurrently proposing optimization methods aimed at mitigating these effects and enhancing ecological protection.

Subsequently, Chapters 4 and 5 develop the theoretical and practical framework of the economic evaluation. Extensive reference is made to capital expenditures (CAPEX), operational expenditures (OPEX), and depreciation methods, which are then applied to the financial appraisal of the project under consideration. The sixth chapter is dedicated to the Environmental Impact Assessment (EIA), offering an analytical breakdown of its structure, the applicable legislative framework, as well as the recent reforms governing the environmental permitting regime in Greece.

The thesis concludes with the formulation of well-substantiated proposals for technological and environmental upgrades, spatial planning optimization, social acceptance enhancement, and the integration of Energy Storage Systems (ESS), thereby contributing to the promotion of sustainability and the active involvement of the local community.

Keywords: Wind Energy, Techno-economic Evaluation, Environmental Impact Assessment (EIA)

Εισαγωγή

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Η πορεία της ανθρωπότητας προς τον πολιτισμό και την πρόοδο είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ικανότητά της να δαμάζει τις δυνάμεις της φύσης. Από τα αρχαία υδροτριβεία και τους παραδοσιακούς ανεμόμυλους έως και την αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας, ο άνθρωπος διαχρονικά τιθασεύει και εκμεταλλεύεται την ενέργεια που το περιβάλλον του προσφέρει. Έτσι, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι στη σύγχρονη εποχή, οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελούν τη γέφυρα ανάμεσα στην παράδοση και το βιώσιμο μέλλον.

Η εκμετάλλευση της υδροηλεκτρικής ενέργειας, η οποία αποκαλείται και ως «λευκός άνθρακας», κατέχει τα πρωτεία στην υπηρεσία του ανθρώπινου πολιτισμού. Παρά τις συχνές και εκτενείς αναφορές σε ρωμαϊκά και ασιατικά κείμενα, η τεχνολογική της απαρχή είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το ελληνικό πνεύμα. Ορισμένες πρώιμες περιγραφές μηχανισμών μετάδοσης κίνησης αποδίδονται στον Αριστοτέλη, ενώ ο Μηχανισμός των Αντικυθήρων αποτελεί το πλέον εμβληματικό δείγμα της αρχαίας υδραυλικής και μηχανικής πολυπλοκότητας.

Στην Ευρώπη της Αναγέννησης, ο Leonardo da Vinci αναβίωσε και εξέλιξε αυτές τις αρχές, σχεδιάζοντας υδροτροχούς που αύξαναν κατακόρυφα την δυνατότητα επεξεργασίας αγροτικών προϊόντων. Ο ίδιος θεωρούσε το νερό ως το «όχημα της φύσης» (*vetturale della natura*), με μεγάλο μέρος των μελετών του να αφιερώνεται αποκλειστικά στην εκμετάλλευση της κινητικής του ενέργειας. Στην προβιομηχανική Ελλάδα, η υδροκίνηση αποτέλεσε βασικό κινητήριο μοχλό της τοπικής οικονομίας. Μέσα από τα υδροτριβεία, τις δριστελέες, τα μπατάνια και τους παραδοσιακούς μύλους, η δυναμική ενέργεια των υδάτων μετατράπηκε σε πλούτο, στηρίζοντας την πρώτη σοβαρή βιοτεχνική απόπειρα της χώρας πριν την επικράτηση των ορυκτών καυσίμων. Παράλληλα με το νερό, ο άνεμος άρχισε να τιθασεύεται συστηματικά στην Ευρώπη από τον 12ο αιώνα. Οι πρώτοι ανεμόμυλοι σε Αγγλία, Γαλλία και Ολλανδία προσέφεραν λύσεις και δυναμική στην άλεση και την άντληση υδάτων (Gipe, 1995), συμβάλλοντας καθοριστικά στην αγροτική άνθηση της Βόρειας Ευρώπης (Burton et al., 2011). Στην Ελλάδα, οι εμβληματικοί ανεμόμυλοι των Κυκλάδων, από τον 16ο αιώνα και μετά, αναδείχθηκαν σε αναπόσπαστο κομμάτι της νησιωτικής παραγωγής (Kaldellis & Zafirakis, 2011).

Η μετάβαση στη σύγχρονη εποχή σηματοδοτήθηκε στα τέλη του 19ου αιώνα από τον Δανό Poul la Cour, ο οποίος μετασχημάτισε την ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρισμό (Andersen, 1999). Παρ' αυτά, η ερευνητική δραστηριότητα που έλαβε χώρα στα μέσα του 20ού αιώνα σε Γερμανία και Σοβιετική Ένωση ήταν εκείνη που έθεσε τις βάσεις για τη σημερινή βιομηχανία (Twidell & Weir, 2015).

Αναφορικά με την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, αν και φαντάζει σύγχρονο επίτευγμα, διαθέτει βαθιές ιστορικές ρίζες. Ήδη από την αρχαιότητα, Έλληνες και Ρωμαίοι εφάρμοζαν τεχνικές παθητικής ηλιακής θέρμανσης, χρησιμοποιώντας κάτοπτρα για την εστίαση του φωτός και τη θέρμανση κτιρίων.

Η επιστημονική όμως επανάσταση συντελέστηκε το 1839, όταν ο Γάλλος φυσικός Alexandre Edmond Becquerel παρατήρησε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, τη φυσική διαδικασία κατά την οποία το φως (ηλιακή ακτινοβολία) μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Παρά τις σταδιακές βελτιώσεις των επόμενων δεκαετιών, ο πραγματικός σταθμός στην ιστορία της ηλιακής ενέργειας ήρθε το 1954, με τη δημιουργία της πρώτης πρακτικά εφαρμόσιμης ηλιακής κυψέλης από τα εργαστήρια Bell. Η τεχνολογία αυτή βρήκε το ιδανικό πεδίο εφαρμογής της στον διαστημικό αγώνα της δεκαετίας του 1960, καθώς οι δορυφόροι και τα διαστημόπλοια απαιτούσαν αυτόνομες και αξιόπιστες πηγές ενέργειας. Η επιτυχία στις διαστημικές αποστολές απέδειξε τη δυναμική της ηλιακής ισχύος, οδηγώντας σε περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη.

Η εν γένει χρήση των ΑΠΕ, παρόλη την επιστημονική πρόοδο στον τομέα παρέμενε παγκοσμίως περιορισμένη μέχρι σχεδόν τα τέλη του 20^{ου} αιώνα. Η πετρελαϊκή κρίση του 1973 και οι γεωπολιτικές εντάσεις στον Περσικό Κόλπο λειτούργησαν ως καταλύτες για την επερχόμενη παγκόσμια ενεργειακή στροφή. Η Δανία ηγήθηκε της προσπάθειας αναπτύσσοντας τα πρώτα εμπορικά αιολικά μοντέλα (Morthorst, 2004), ενώ η Ελλάδα εισήλθε στη νέα εποχή το 1982 με την δημιουργία της πρώτης αιολικής μονάδας στην Κύθνο.

Η θεσμική ωρίμανση στην Ελλάδα επήλθε μέσω δύο κομβικών νομοθετημάτων:

- i) Νόμος 2244/1994: Επιτρέπει την ιδιωτική ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ.
- ii) Νόμοι 3468/2006 & 3851/2010: Απλοποιούν τις αδειοδοτικές διαδικασίες και ενισχύουν τις επενδύσεις (Kaldellis, 2008).

Η σύγχρονη αντίληψη για την ενέργεια οριοθετήθηκε το 1987, όταν τα Ηνωμένα Έθνη εισήγαγαν την έννοια της Αειφόρου Ανάπτυξης. Η αειφόρος (ή βιώσιμη) ανάπτυξη ορίστηκε ως: «Η ανάπτυξη που ικανοποιεί τις ανάγκες του παρόντος χωρίς να

διακυβεύει την ικανότητα των μελλοντικών γενεών να ικανοποιήσουν τις δικές τους ανάγκες». Πρόκειται ουσιαστικά για το μοντέλο εκείνο ανάπτυξης που διασφαλίζει τις ανάγκες του παρόντος χωρίς να υποθηκεύει το μέλλον των επόμενων γενεών (Βλάχου, 2001).

Σήμερα, υπό το πρίσμα της Ατζέντας 2030, η διεθνής κοινότητα δεσμεύεται για τη μετάβαση σε αξιόπιστα και οικονομικά συστήματα χαμηλών ρύπων. Η Ευρώπη πρωτοπορεί πλέον στην υπεράκτια αιολική ενέργεια (WindEurope, 2022), ενώ η Ελλάδα, αξιοποιώντας το πλούσιο θαλάσσιο δυναμικό της, προχωρά σε στρατηγικές επενδύσεις που θα την καταστήσουν ενεργειακό κόμβο στη Μεσόγειο, εφαρμόζοντας ταυτόχρονα αυστηρά πρωτόκολλα επαλήθευσης των περιβαλλοντικών της στόχων.

1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αντιπροσωπεύουν τη φυσική απάντηση στην ανάγκη για ενεργειακή αυτονομία και περιβαλλοντική προστασία. Πρόκειται για πόρους που απορρέουν από διαρκή φυσικά φαινόμενα, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η ροή των ανέμων, η κίνηση των υδάτων, η γεωθερμία και η βιομάζα.

Σε αντίθεση με τα συμβατικά καύσιμα που εναπόκεινται σε περιορισμένα αποθέματα και επομένως εξαντλούνται, οι ΑΠΕ διακρίνονται για τον ανεξάντλητο ορίζοντά τους και το καθαρό περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα. Η αξιοποίησή τους δεν συνοδεύεται από την έκλυση τοξικών αποβλήτων ή ραδιενεργών στοιχείων, καθιστώντας τες το βασικό εργαλείο για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής. Επιπροσθέτως, η μετάβαση στις ΑΠΕ, δεν είναι πλέον μόνο ζήτημα οικολογικής ευαισθησίας, αλλά και οικονομικής επιβίωσης και ενεργειακής ασφάλειας για τα κράτη και τους πληθυσμούς τους (IRENA, 2022).

Σήμερα, η κύρια πρόκληση παραμένει η ανάπτυξη τεχνολογιών υψηλής αξιοπιστίας που θα καταστήσουν αυτές τις πηγές οικονομικά προσιτές για μαζική χρήση.

1.3 Κατηγορίες ΑΠΕ

Οι κύριες μορφές ΑΠΕ, που σήμερα χρησιμοποιούνται, χωρίζονται στις εξής κατηγορίες.

ι) Υδροηλεκτρική ενέργεια: Η υδροηλεκτρική ενέργεια αποτελεί μια ανανεώσιμη πηγή, όπου η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από την κίνηση του νερού, καθώς αυτό μετακινείται από μεγαλύτερο σε μικρότερο υψόμετρο. Η συγκεκριμένη ΑΠΕ επιτυγχάνει τις καλύτερες αποδόσεις μετατροπής από όλες τις γνωστές πηγές ενέργειας. Η ποσότητα της ενέργειας που παράγεται σχετίζεται άμεσα με το ύψος

και τον όγκο του νερού. Εν γένει, η υδροηλεκτρική ενέργεια, θεωρείται ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, εκμεταλλεύομενη ποτάμια και φράγματα, είτε τεχνητά είτε φυσικά.

ii) Ηλιακή ενέργεια: Είναι η ενέργεια που παράγεται από την αξιοποίηση των τεχνολογιών που εκμεταλλεύονται την θερμότητα και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα του ήλιου. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, διακρίνονται σε: α) Ενεργητικά Ηλιακά Συστήματα που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα. β) Παθητικά Ηλιακά και Υβριδικά Συστήματα που αφορούν κατάλληλες αρχιτεκτονικές λύσεις και χρήση κατάλληλων δομικών υλικών για τη μεγιστοποίηση της απ' ευθείας εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας για θέρμανση, κλιματισμό ή φωτισμό. γ) Φωτοβολταϊκά Ηλιακά Συστήματα τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια άμεσα σε ηλεκτρική ενέργεια.

iii) Αιολική ενέργεια: Η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του ανέμου. Το όνομά της προκύπτει από την ελληνική μυθολογία και τον Αίολο ο οποίος ήταν ο θεός του ανέμου. Η αιολική ενέργεια δημιουργείται έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία, γιατί η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης προκαλεί τη μετακίνηση μεγάλων αέριων μαζών λόγω διαφοράς πίεσης από τη μια περιοχή στην άλλη, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό τους ανέμους.

iv) Βιομάζα: Είναι αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας, που μετασχηματίζει την ηλιακή ενέργεια με μία σειρά διεργασιών των φυτικών οργανισμών χερσαίας ή υδρόβιας προέλευσης. Με την βιομάζα συνδέονται τα βιοκαύσιμα, υγρά, αέρια ή στερεά καύσιμα που παράγονται από τη βιομάζα, δηλαδή από οργανική ύλη φυτικής ή ζωικής προέλευσης και που διαθέτει ανανεώσιμο χαρακτήρα.

v) Γεωθερμία: Είναι η θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης και εμπεριέχεται σε φυσικούς ατμούς, σε επιφανειακά ή υπόγεια θερμά νερά και σε θερμά ξηρά πετρώματα.

1.4 Ορισμοί και βασικά στοιχεία της αιολικής ενέργειας και των αιολικών πάρκων

Η αιολική ενέργεια είναι ένας είδος ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, η οποία παράγεται από την εκμετάλλευση των ανέμων μετατρέποντάς την σε ηλεκτρική. Η παραγωγή της γίνεται με έμμεσο τρόπο και αποτελεί προϊόν της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, η οποία διαμορφώνεται από τρεις καθοριστικούς παράγοντες: Α) Την ηλιακή ακτινοβολία που προκαλεί θερμικές διαφορές, Β) Τη μορφολογία του εδάφους που επηρεάζει τη ροή του αέρα και Γ) Την περιστροφή της Γης (δύναμη Coriolis).

Το φαινόμενο της ανομοιόμορφης θέρμανσης της γήινης επιφάνειας που προκύπτει και λόγω του ανάγλυφου της, γεννά τους ανέμους λόγω της διαφοράς πίεσης που παρουσιάζεται στην ατμόσφαιρα. Η κινητική ενέργεια των ανέμων μετατρέπεται σε μηχανικό έργο μέσω των ανεμογεννητριών. Πρόκειται για έναν ανανεώσιμο πόρο με μηδενικό αποτύπωμα, που αναγεννάται συνεχώς από τις δυνάμεις της φύσης.

Η συγκεκριμένη ΑΠΕ παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα. Λόγω του γεγονότος ότι η αιολική ενέργεια είναι σποραδική, υπάρχουν χρονικές στιγμές που δεν μπορεί να παράγει ικανοποιητική ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, διαθέτει μεταβλητή ισχύ, η οποία ποικίλλει κατά τη διάρκεια μικρότερων χρονικών περιόδων, αλλά ολιστικά από έτος σε έτος παραμένει σχετικά σταθερή με μικρές αποκλίσεις. Λόγω των παραπάνω, προκειμένου να εξασφαλιστεί μια σταθερή και αξιόπιστη παροχή ενέργειας, είναι σημαντικό η συγκεκριμένη μορφή ενέργειας ή να χρησιμοποιείται συνδυαστικά με άλλες ηλεκτρικές πηγές ή να αποθηκεύεται.

Οι συμβατικές πηγές ενέργειας, απαιτούνται για τη διατήρηση της αύξησης της αιολικής ενέργειας σε μια δεδομένη περιοχή. Ωστόσο, ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να χρειαστεί καθοριστικές αλλαγές, προκειμένου να λειτουργήσει. Η εφαρμογή στρατηγικών διαχείρισης ενέργειας, που λαμβάνουν υπόψιν παράγοντες, όπως είναι η διαθεσιμότητα πηγών τροφοδοσίας, η πλεονάζουσα δυναμικότητα, η υδροηλεκτρική ενέργεια, η εξαγωγή και η εισαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οι γεωγραφικά διασκορπισμένες ανεμογεννήτριες, η αποθήκευση ενέργειας ή ακόμη και η μείωση της ζήτησης σε περιόδους χαμηλής παραγωγής αιολικής ενέργειας, μπορούν να συμβάλουν στην επίτευξη αυτής της αναβάθμισης - αλλαγής. Η πρόβλεψη του καιρού, αποτελεί επίσης ένα κρίσιμο εργαλείο για το ηλεκτρικό σύστημα, καθώς επιτρέπει τον προληπτικό σχεδιασμό για τις αναμενόμενες διακυμάνσεις στην παραγωγή ενέργειας.

Ως αιολικό πάρκο (Α.Π.) θεωρείται μια οργανωμένη συστοιχία ανεμογεννητριών σε περιοχές με υψηλό και σχετικά σταθερό αιολικό δυναμικό. Τα πάρκα αυτά διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα χερσαία, που εγκαθίστανται σε ορεινούς όγκους, λόφους ή πεδιάδες, και τα θαλάσσια (offshore), τα οποία τοποθετούνται στο θαλάσσιο περιβάλλον, είτε με σταθερή εγκατάσταση στο βυθό, είτε ως πλωτές κατασκευές. Πιο εξειδικευμένα:

1. Χερσαία αιολικά πάρκα

Τα χερσαία Α.Π. αποτελούν συστοιχίες ανεμογεννητριών που αξιοποιούν το αιολικό δυναμικό εκτεταμένων περιοχών. Βασικά χαρακτηριστικά της στρατηγικής ανάπτυξής τους περιλαμβάνουν: Α) Την τοποθεσία: Εγκαθίστανται σε πεδιάδες ή λόφους, με ελάχιστη απόσταση 3 χλμ. από την ακτή. Β) Την διάταξη: Οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται σε αποστάσεις άνω των 50 μέτρων μεταξύ τους. Γ) Την αποδοτικότητα χώρου: Ενώ ένα πάρκο 20 μονάδων μπορεί να δεσμεύει ονομαστικά μια έκταση 4 τ.χ., οι μόνιμες εγκαταστάσεις και οι δρόμοι πρόσβασης καταλαμβάνουν μόνο το 2% αυτής της έκτασης. Δ) Το σχεδιασμό: Η επιτυχής εγκατάσταση βασίζεται σε αυστηρές μελέτες χωροθέτησης που λαμβάνουν υπόψη τις περιοχές αποκλεισμού, διασφαλίζοντας την περιβαλλοντική και οικιστική ισορροπία.

2. Θαλάσσια αιολικά πάρκα

Τα θαλάσσια αιολικά πάρκα αποτελούν την αιχμή του δόρατος στην παραγωγή ενέργειας, καθώς εκμεταλλεύονται τους ισχυρούς ανέμους που πνέουν στο θαλάσσιο περιβάλλον. Η υπεροχή τους έναντι των χερσαίων έγκειται στην υψηλότερη ταχύτητα ανέμου, η οποία μεταφράζεται σε μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση.

Βασικά και καθοριστικά σημεία της λειτουργίας τους είναι τα παρακάτω: Α) Το βάθος η και έδραση: Η εγκατάσταση είναι εφικτή ακόμα και σε βάθη που ξεπερνούν τα 200 μέτρα, αναλόγως της γεωλογίας του πυθμένα. Β) Η διασύνδεση: Το σύστημα αποτελείται από τις ανεμογεννήτριες, έναν θαλάσσιο υποσταθμό και έναν χερσαίο υποσταθμό που υποδέχεται την ενέργεια στην ακτή. Γ) Η Χωροθέτηση: Για την αποφυγή ποικίλων αεροδυναμικών παρεμβολών, η απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών πρέπει να είναι τουλάχιστον $2,5 \cdot d$ (όπου d η διάμετρος της φτερωτής), ενώ τηρείται μια ελάχιστη απόσταση ασφαλείας 1,5 χλμ. από την ακτογραμμή.

1.5 Η αιολική ενέργεια στην Ελλάδα

Η Ελλάδα υπήρξε πρωτοπόρος σε ευρωπαϊκό επίπεδο με την εγκατάσταση του πρώτου αιολικού πάρκου στην Κύθνο το 1982. Το έργο αυτό, ισχύος μόλις 100 kW, αποτέλεσε το έναυσμα για την έρευνα στον τομέα των μικροδικτύων. Η μετάβαση στην εμπορική εκμετάλλευση εδραιώθηκε τη δεκαετία του 1990, με την εγκατεστημένη ισχύ των αιολικών πάρκων στην Ελληνική επικράτεια να φτάνει τα 107 MW το 1999, ενώ η περίοδος 2010-2026 σηματοδότησε την συνολική επικράτηση της αιολικής τεχνολογίας στην χώρα.

Η αύξηση της αιολικής ισχύος στην Ελλάδα χαρακτηρίζεται ως εκθετική. Πιο συγκεκριμένα, η συνολική αύξηση την περίοδο 1982 έως το 2026 ήταν από τα 0,1 MW στα ~5.600 MW. Καταγράφεται μια ποσοστιαία αύξηση της τάξης του 5.600.000%. Ακόμη, μέσα στα τελευταία 27 έτη (1999-2026), η ισχύς αυξήθηκε κατά 5.133%, επιβεβαιώνοντας τη στροφή της χώρας προς την πράσινη ενέργεια.

Παρά την πρόσφατη, ραγδαία διείσδυση των φωτοβολταϊκών, η αιολική ενέργεια διατηρεί στρατηγικό ρόλο στην ενεργειακή πολιτική της χώρας. Σήμερα, αντιπροσωπεύει περίπου το 37% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος των ΑΠΕ, πίσω από τα φωτοβολταϊκά που κατέχουν τη μερίδα του λέοντος (~55%), ενώ το υπόλοιπο 8% καλύπτεται από Υδροηλεκτρικά, Βιομάζα και Γεωθερμία. Εξετάζοντας την ενεργειακή συνεισφορά, λόγω του υψηλότερου συντελεστή φόρτισης (capacity factor) σε σχέση με τον ήλιο, η αιολική ενέργεια συχνά εξισορροπεί την παραγωγή κατά τις νυχτερινές ώρες, συμβάλλοντας καθοριστικά στη σταθερότητα του συστήματος.

Η τεχνολογική πρόοδος επέτρεψε τη χρήση λιγότερων αλλά ισχυρότερων ανεμογεννητριών. Μια σύγχρονη ανεμογεννήτρια (Α/Γ) οριζόντιου άξονα παράγει έως και 300 φορές περισσότερη ενέργεια από τις αρχικές μονάδες του 1982.

Η χωροθέτηση των αιολικών πάρκων ακολουθεί πλέον αυστηρά κριτήρια. Τα χερσαία πάρκα θα πρέπει να έχουν ελάχιστη απόσταση 3 χιλιομέτρων από την ακτογραμμή και 50 μέτρων μεταξύ των Α/Γ (Τριανταφυλλίδης, 2018; Μπαρδάκης, 2018). Τα θαλάσσια πάρκα έχουν ελάχιστη απόσταση από την ακτή 1,5 χλμ. και μεταξύ των Α/Γ απόσταση μεγαλύτερη των 2,5d (Αψερού, 2017).

Η Ελλάδα έχει υπερβεί το αρχικό στάδιο της απλής υιοθέτησης της αιολικής ενέργειας και εισέρχεται πλέον στη φάση της Υπεράκτιας Ανάπτυξης και της Αποθήκευσης. Με

στόχο τα 1,9 GW θαλάσσιων αιολικών έως το 2030, η χώρα αναμένεται να καταστεί ενεργειακός κόμβος για την ευρύτερη περιοχή της Νοτιοανατολικής Ευρώπης.

Τεχνολογικός Εξοπλισμός Αιολικού Πάρκου

2.1 Ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες ορίζονται ως ένα σύστημα μεταφοράς αιολικής ενέργειας. Η αρχή λειτουργίας τους είναι να εκμεταλλεύονται την κινητική ενέργεια του ανέμου, που κατευθύνεται πάνω στα πτερύγιά τους και με τους κατάλληλους μηχανισμούς να τη μετατρέπουν σε ηλεκτρική, παράγοντας ρεύμα ως προς το δίκτυο. Ουσιαστικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι λειτουργούν με την αντίστροφη λογική ενός οικιακού ανεμιστήρα.

2.2 Τεχνολογικά τμήμα – Μέρη ανεμογεννήτριας

Για την κατασκευή και την εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας θα πρέπει να δοθεί έμφαση στα δομικά χαρακτηριστικά που την απαρτίζουν και να ληφθεί υπόψιν το περιβάλλον όπου θα τοποθετηθεί.

Αρχικά, είναι ιδιαίτερα σημαντική η βάση - θεμελίωση της ανεμογεννήτριας, αφού σε αυτήν πρακτικά στηρίζεται ο σταθμός παραγωγής. Η βάση είναι απαραίτητο να είναι ισχυρή ώστε πέρα από το βάρος της ανεμογεννήτριας να μπορεί κρατήσει σταθερό έναν πυλώνα που δέχεται τεράστιες πιέσεις από τον άνεμο. Η κατασκευή της είναι μια τεράστια πλάκα από οπλισμένο σκυρόδεμα που εισχωρεί βαθιά στο έδαφος. Στα θαλάσσια πάρκα, η βάση μπορεί να είναι ένας ατσάλινος σωλήνας καρφωμένος στο βυθό ή μια πλωτή πλατφόρμα.

Εφόσον, ολοκληρωθεί η θεμελίωση στο έδαφος τοποθετείται ο πύργος. Ο πυλώνας υποστηρίζει τη συνολική ηλεκτρομηχανολογική διάταξη και συνήθως η δομή του είναι κοίλη ή δικτυωτή, ενώ σε σπάνιες περιπτώσεις κατασκευάζεται και από οπλισμένο σκυρόδεμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο πυλώνας πρέπει να είναι έχει μεγάλο ύψος, διότι οι ταχύτητες του ανέμου αυξάνονται όσο απομακρυνόμαστε από το έδαφος και συνεπώς, όσο μεγαλύτερο υψόμετρο, τόσο καλύτερη η απόδοση μιας ανεμογεννήτριας. Πάνω στο πυλώνα βρίσκεται η άτρακτος και μέσα σε αυτήν περιέχονται όλα τα βασικά στοιχεία της ανεμογεννήτριας. Αυτά είναι τα εξής:

1. Ο κύριος άξονας που μεταφέρει την κίνηση από τα πτερύγια προς το εσωτερικό μηχανισμό.
2. Το κιβώτιο ταχυτήτων που συνδέει το διαφορικό χαμηλών στροφών και μεταφέρει την κίνηση στο διαφορικό υψηλών στροφών κάνοντάς το να περιστρέφεται με

ταχύτητα 50 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με τις χαμηλές στροφές. Όλος αυτός ο μηχανισμός αποτελεί το σύστημα μετάδοσης κίνησης.

3. Η γεννήτρια, η οποία έχει τον κυρίαρχο ρόλο, διότι μέσω αυτής γίνεται η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική μέσω ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.
4. Τέλος, το σύστημα πέδησης, το οποίο σταματά τη φτερωτή, μέσω ενός δισκοφρένου, σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης ή πολύ ισχυρών ανέμων για προστασία.

Μπροστά από την άτρακτο βρίσκεται ο δρομέας (rotor system), ο οποίος αποτελεί το κινητό μέρος που έρχεται σε επαφή με τον άνεμο και περιλαμβάνεται από: α) Την πλήμνη, που είναι το κεντρικό σημείο όπου ενώνονται τα πτερύγια. β) Τα πτερύγια, τα οποία είναι κατασκευασμένα από συνθετικά υλικά. Τα πτερύγια λειτουργούν όπως τα φτερά του αεροπλάνου, δημιουργώντας ανύψωση και αναγκάζοντας έτσι την περιστροφή του δρομέα. γ) Το σύστημα ρύθμισης κλίσης. Πρόκειται για τον μηχανισμό που βρίσκεται μέσα στη πλήμνη και στρίβει τα ίδια τα πτερύγια γύρω από τον άξονά τους, ώστε αυτά να συναντούν τον αέρα με την ιδανική γωνία.

Εντός του πυλώνα και στη βάση της ατράκτου βρίσκεται το Σύστημα Προσανατολισμού (Yaw System) το οποίο περιστρέφει όλη την άτρακτο. Η περιστροφή της ατράκτου πραγματοποιείται ώστε η φτερωτή να ευθυγραμμίζεται πάντα κατά πρόσωπο τον άνεμο. Επιπλέον, όταν η ταχύτητα του ανέμου που δέχεται η ανεμογεννήτρια, έχει φτάσει τις ονομαστικές στροφές που έχει ορίσει ο κατασκευαστής, με συνέπεια η ανεμογεννήτρια να αποδίδει τη μέγιστη μηχανική ισχύ, για την προστασία της από υπερφόρτωση η περιστροφή της ατράκτου αλλάζει τον προσανατολισμό της.

Τέλος, για να γίνουν όλες οι λειτουργίες που προαναφέρθηκαν, στο πίσω μέρος της ατράκτου υπάρχουν συστήματα ελέγχου και αισθητήρες, όπως:

- Το ανεμόμετρο που μετρά την ταχύτητα του ανέμου.
- Η μονάδα ψύξης που περιέχει ένα ηλεκτρικό ανεμιστήρα που χρησιμοποιείται για την ψύξη της γεννήτριας. Επιπλέον, υπάρχει και μονάδα ψύξης με λάδι της οποίας η κύρια χρήση της είναι να ψύχει το λάδι στο κιβώτιο ταχυτήτων. Ωστόσο, μερικές ανεμογεννήτριες διαθέτουν και υδρόψυκτες γεννήτριες.
- Το υδραυλικό σύστημα, το οποίο χρησιμοποιείται για την επαναφορά των αεροδυναμικών φρένων της ανεμογεννήτριας.

- Ο ανεμοδείκτης που υπολογίζει τη διεύθυνση του ανέμου και στέλνει σήμα στο σύστημα προσανατολισμού (Yaw).
- Ο ηλεκτρονικός πίνακας και ο πίνακας ελέγχου. Τα συστήματα αυτά βρίσκονται στη βάση του πυλώνα. Εντός του ηλεκτρονικού πίνακα υπάρχει ένας υπολογιστής που παρακολουθεί διαρκώς την κατάσταση της ανεμογεννήτριας και συντονίζει όλο το σύστημα λειτουργίας. Σε κάθε περίπτωση επιλοκής η ανεμογεννήτρια σταματά αυτόματα και στέλνει σήμα στον αντίστοιχο ελεγκτή μέσω τηλεφωνικής σύνδεσης για την επίλυση του προβλήματος.

2.3 Κατηγορίες ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες που υπάρχουν στο δίκτυο κατηγοριοποιούνται με βάση:

- Α. Τη θέση του άξονα περιστροφής τους ως προς τη Γη.
- Β. Ο τύπος και ο τρόπος ελέγχου της γεννήτριας καθώς και η δυνατότητα μεταβολής της ταχύτητας.
- Γ. Η μηχανική ισχύ που παρέχουν.
- Δ. Ο τύπος των πτερυγίων και ο τρόπος ελέγχου της γωνίας τους.
- Ε. Η ταχύτητα περιστροφής τους.

Με βάση τη θέση περιστροφής ως προς τη Γη οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε: ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα και ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα. Πιο αναλυτικά:

i. Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα (HAWT – horizontal axis wind turbine)

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα διαθέτουν άξονα περιστροφής παράλληλο προς την επιφάνεια του εδάφους και τη διεύθυνση του ανέμου. Σε αντίθεση με τους παραδοσιακούς ανεμόμυλους, φέρουν συνήθως δύο ή τρία πτερύγια υψηλής αεροδυναμικής απόδοσης. Η κυριαρχία τους στην αγορά οφείλεται στη δυνατότητά τους να εκμεταλλεύονται ισχυρότερους ανέμους λόγω του μεγάλου ύψους τους, καθώς και λόγω της ανώτερης αποδοτικότητάς τους έναντι των μονάδων κατακόρυφου άξονα. Ωστόσο, το μεγάλο τους μέγεθος αυξάνει το κόστος κατασκευής και μεταφοράς, ενώ η λειτουργία τους προκαλεί ηχητική όχληση. Επιπλέον, για τη βέλτιστη απόδοση, απαιτούν έναν εξειδικευμένο μηχανισμό προσανατολισμού ώστε τα πτερύγια τους να παραμένουν διαρκώς στραμμένα προς την κατεύθυνση του ανέμου.

ii. Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (VAWT – vertical axis wind turbine)

Σε αυτή την κατηγορία, ο άξονας περιστροφής παραμένει σταθερός και κάθετος προς τη Γη. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι είναι "πανκατευθυντικές", δηλαδή

λειτουργούν με άνεμο από κάθε κατεύθυνση. Ωστόσο, υστερούν ως προς την αποδοτικότητα. Παρά τους πολλούς τύπους σχεδιασμού (π.χ. Savonius, Darrieus), δεν μπορούν να φτάσουν τα επίπεδα απόδοσης των οριζόντιων μονάδων. Ακόμη, υστερούν ως προς την επικράτηση. Η χαμηλότερη απόδοση ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας σάρωσης οδήγησε στην κυριαρχία των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα στις μεγάλες επενδύσεις.

Η ταξινόμηση των ανεμογεννητριών καθορίζεται ακόμη από τον τύπο της γεννήτριας, το σύστημα ελέγχου και τη δυνατότητα μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής. Βάσει αυτών των χαρακτηριστικών διακρίνονται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες.

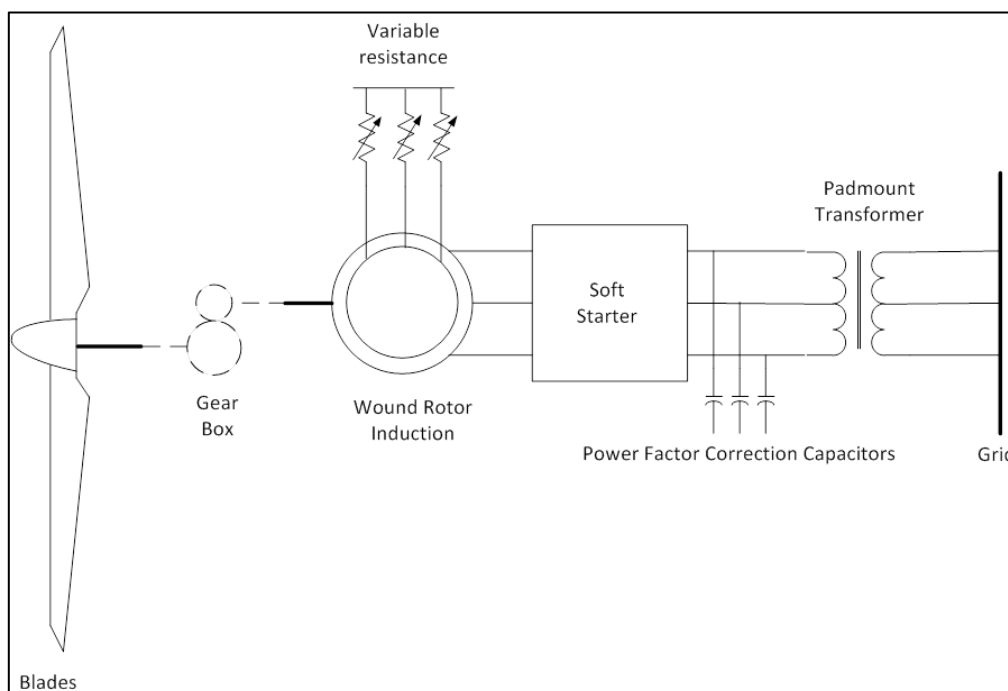
Η πρώτη, αφορά ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας που ενσωματώνουν επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου δρομέα (SCIG). Η σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο πραγματοποιείται απευθείας μέσω μετασχηματιστή. Λόγω της ανάγκης των επαγωγικών γεννητριών για άεργο ισχύ, η διάταξη περιλαμβάνει συστοιχίες πυκνωτών για την απαραίτητη αντιστάθμιση, ενώ η χρήση ενός ήπιου εκκινητή (soft-starter) διασφαλίζει την ομαλή διασύνδεση με το δίκτυο (Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1: Παράδειγμα ανεμογεννητριών γνωστών ως «Δανική Ιδέα» (Danish Concept).

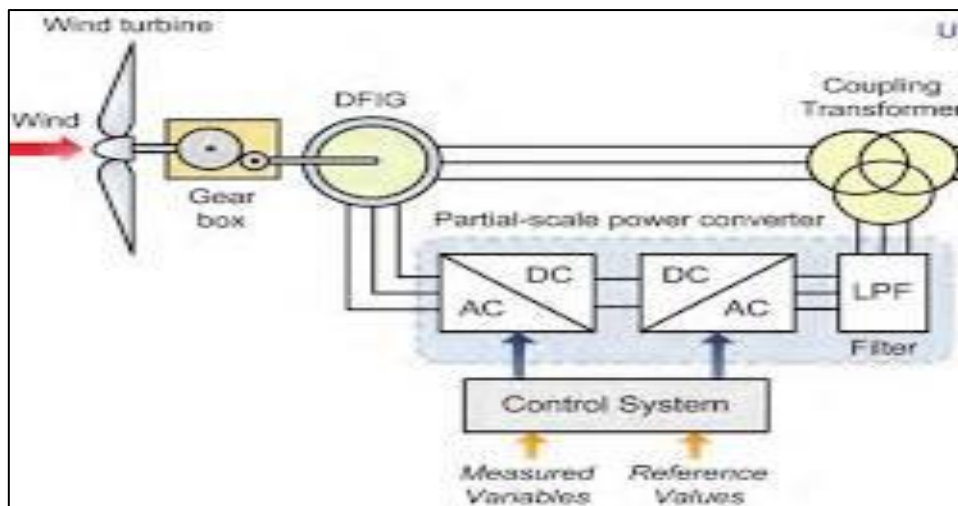
Η δεύτερη κατηγορία αφορά τις ανεμογεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα με εξωτερικές αντιστάσεις, οι οποίες προσφέρουν περιορισμένο έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής. Η αρχιτεκτονική αυτή βασίζεται στη μεταβολή της συνολικής αντίστασης του κυκλώματος του δρομέα μέσω εξωτερικών αντιστάσεων, επιτρέποντας μια διακύμανση της ταχύτητας που δεν υπερβαίνει το 10% της ονομαστικής. Η συγκεκριμένη τεχνολογία (συχνά αναφερόμενη και ως "μεταβλητή ολίσθηση") υπήρξε

ιδιαίτερα διαδεδομένη μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του '90, καθώς προσέφερε μια πρώτη λύση στην απορρόφηση των κραδασμών από τις ριπές του ανέμου (Εικόνα 2.2)



Εικόνα 2.2: Σχηματική απεικόνιση επαγωγικής γεννήτριας δακτυλιοφόρου δρομέα.

Η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει τις ανεμογεννήτριες διπλής τροφοδότησης (Doubly-Fed Induction Generators – DFIG) (Εικόνα 2.3), οι οποίες ενσωματώνουν γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα και έναν μετατροπέα συχνότητας για την τροφοδοσία του δρομέα. Ο μετατροπέας αυτός είναι διαστασιολογημένος σε ένα κλάσμα της συνολικής ισχύος της μηχανής (συνήθως στο 25-30%), καθιστώντας το σύστημα ιδιαίτερα αποδοτικό και οικονομικό. Το μέγεθος του μετατροπέα καθορίζει το εύρος ρύθμισης της ταχύτητας περιστροφής, το οποίο στις τυπικές εφαρμογές κυμαίνεται στο $\pm 30\%$ ως προς τη σύγχρονη ταχύτητα, προσφέροντας εξαιρετική ευελιξία και έλεγχο της παρεχόμενης ισχύος.



Εικόνα 2.3: Σχηματική απεικόνιση ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης.

Η τέταρτη κατηγορία αφορά ανεμογεννήτριες πλήρως μεταβλητής ταχύτητας, οι οποίες προσφέρουν τη δυνατότητα ελέγχου σε όλο το εύρος στροφών (από 0 έως 100% της ονομαστικής ταχύτητας). Στη διάταξη αυτή, η γεννήτρια αποσυνδέεται πλήρως από το δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα συχνότητας πλήρους ισχύος (Full Power Converter), ο οποίος παρεμβάλλεται μεταξύ του στάτη και του δικτύου. Η ευελιξία του συστήματος επιτρέπει τη χρήση διαφόρων τύπων ηλεκτρικών μηχανών, όπως ασύγχρονων γεννητριών, σύγχρονων με διεγερόμενο δρομέα, καθώς και σύγχρονων γεννητριών μόνιμου μαγνήτη (PMSG), προσφέροντας βέλτιστη ενεργειακή απόδοση και πλήρη υποστήριξη των αναγκών του δικτύου.

Ένας επιπλέον καθοριστικός παράγοντας για τη διάκριση των ανεμογεννητριών είναι η παραγόμενη ονομαστική μηχανική ισχύς ($P_{μηχ.}$). Με γνώμονα αυτό το μέγεθος, οι μηχανές κατατάσσονται στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες:

1. **Μικρής κλίμακας (Micro – wind/ Small – scale):** Ανεμογεννήτριες με ισχύ της τάξεως 50 W έως 100 kW. Η κατηγορία κατατάσσεται σε συστήματα για αυτόνομη χρήση και όχι για μαζική πώληση ενέργειας στο δίκτυο. Λειτουργούν συχνά σε χαμηλή τάση και συνδυάζονται με συστοιχίες μπαταριών (υβριδικά συστήματα). Είναι εύκολες ως προς την εγκατάστασή τους και έχουν ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης
2. **Μεσαίας κλίμακας (Medium scale):** Ανεμογεννήτριες με ισχύ που ξεκινούν από 100kW και φτάνουν στο 1MW. Χρησιμοποιούνται σε μικρά αιολικά πάρκα, σε απομονωμένα ηλεκτρικά δίκτυα. Ήταν πολύ συνηθισμένες την δεκαετία του '90, και πλέον έχουν αντικατασταθεί από μεγαλύτερες μηχανές σε μεγάλα έργα.

3. **Μεγάλης κλίμακας (Utility – scale):** Ανεμογεννήτριες με την ισχύ τους να ξεκινά το 1MW και να φτάνει έως 5MW. Αυτού του είδους ανεμογεννήτριες τοποθετούνται σε χερσαίες εγκαταστάσεις και παρατηρούνται σε μεγάλα αιολικά πάρκα στα βουνά.
4. **Υπεράκτιες Ανεμογεννήτριες (offshore):** Όπως αναφέρει και ο τίτλος τους είναι ανεμογεννήτριες που εγκαθίστανται αποκλειστικά και μόνο στη θάλασσα, όπου οι άνεμοι είναι ισχυρότεροι και πιο σταθεροί. Η ισχύς τους κυμαίνεται από 7MW έως 15MW.

Εξίσου σημαντικός και καθοριστικός παράγοντας για την ομαλή λειτουργία της ανεμογεννήτριας είναι η ταχύτητα του ανέμου. Εξαιτίας της προσδίδεται και η ονομαστική μηχανική ισχύς, εντός της ατράκτου. Παρ' όλα αυτά αν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει την ορισμένη ονομαστική μπορεί να εμφανιστούν ανωμαλίες στη λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Αυτές οι ανωμαλίες έχουν ως αποτέλεσμα να αυξήσουν υπερβολικά τις στροφές της γεννήτριας, ξεπερνώντας την μέγιστη απόδοσή της και καταλήγοντας στην καταστροφή της.

Για να αποφευχθεί αυτό θα πρέπει να γίνει **έλεγχος της υπάρχουσας ισχύος** και ασφαλείας και αν ξεπερνάει την ονομαστική να αλλάξει η γωνία των πτερυγίων και να πραγματοποιηθεί έλεγχος της γωνία περιστροφής τους. Για αυτόν τον λόγο, δημιουργούνται οι παρακάτω κατηγορίες ανεμογεννητριών με κριτήριο τα συστήματα ελέγχου:

1. **Ανεμογεννήτριες με έλεγχο του βήματος των πτερυγίων (pitch control)**

Σε αυτό το σύστημα, τα πτερύγια λειτουργούν ως φτερά ενός αεροπλάνου. Δηλαδή, τα πτερύγια περιστρέφονται γύρω από τον διαμήκη άξονά τους αλλάζοντας τη γωνία πρόσπτωσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα όταν ο άνεμος είναι πολύ ισχυρός, το σύστημα να μειώνει τη γωνία ώστε να μειώνεται η ασκούμενη ροπή του ανέμου, κρατώντας την ισχύ σταθερή και την κατασκευή ασφαλή.

2. **Παθητικός Αεροδυναμικός Έλεγχος (Passive Stall Control)**

Τα πτερύγια σε αυτή την περίπτωση είναι σταθερά τοποθετημένα στην πλήμνη (hub) και δεν κινούνται. Η λειτουργία βασίζεται στον ειδικό αεροδυναμικό σχεδιασμό των πτερυγίων. Σε υψηλές ταχύτητες, η ροή του αέρα διαταράσσεται επίτηδες στην επιφάνεια του πτερυγίου, δημιουργώντας το φαινόμενο της **απώλειας στήριξης (stall)**. Η ανυψωτική δύναμη σταματά να αυξάνεται, εμποδίζοντας την υπερφόρτωση της γεννήτριας χωρίς την ανάγκη κινητών μερών.

3. **Ενεργός Αεροδυναμικός Έλεγχος (Active Stall Control)**

Συνδυασμός των δύο παραπάνω ελέγχων-μεθόδων, που συναντάται σε μεγάλες ανεμογεννήτριες μεγαλύτερες του 1MW.

Η λειτουργία της είναι ίδια με του pitch control αλλά προς την **αντίθετη κατεύθυνση (negative pitch)**. Τα πλεονεκτήματα που έχει, σε σχέση με τα άλλα δύο, είναι πως υπάρχει πιο ελεγχόμενο φαινόμενο stall, επιτυγχάνει με μεγαλύτερη ακρίβεια στην παραγόμενη ισχύ και μειώνει τις μηχανικές καταπονήσεις στο σύστημα.

Ένα ακόμα κριτήριο για την ταξινόμηση των ανεμογεννητριών βασίζεται στην ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων τους. Με αυτό τον τρόπο οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Τις ταχύστροφες και τις αργόστροφες.

Η διάκριση σε Ταχύστροφες και Αργόστροφες γίνεται με βάση έναν κρίσιμο αδιάστατο αριθμό, τον Λόγο Ταχύτητας Ακροπτερυγίου (Tip Speed Ratio - λ).

Ο τύπος υπολογισμού είναι:

$$\lambda = \frac{\omega_{mech} \cdot r}{V_w}$$

όπου:

- ω_{mech} , η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα (rad/s)
- r , η ακτίνα του ρότορα (m) και
- V_w , η ταχύτητα του ανέμου (m/s)

Οι αργόστροφες έχουν χαμηλό λ (συνήθως < 3), διαθέτουν πολλά πτερύγια και χρησιμοποιούνται κυρίως για άντληση νερού (ανεμοαντλίες). Οι ταχύστροφες έχουν υψηλό λ (συνήθως 4 έως 10), είναι σύγχρονες με 2 ή 3 πτερύγια και χρησιμοποιούνται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

2.4 Διαδικασία Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Όπως προαναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, η αιολική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική με τη χρήση των ανεμογεννητριών. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει να αναλυθεί βήμα προς βήμα η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την αρχή. Αρχικά, η πρώτη μορφή ενέργειας, που εμφανίζεται από τον άνεμο, είναι η κινητική ενέργεια. Όταν ο άνεμος χτυπά, πάνω στα πτερύγια, η μάζα του αέρα που κινείται μεταφέρει κινητική ενέργεια. Καθώς, ο αέρας περιστρέφει το δρομέα, η αεροτομή των πτερυγίων αναγκάζει τον αέρα να ασκήσει δύο δυνάμεις:

- **Ανυψωτική δύναμη (Lift):** Η κύρια δύναμη που προκαλεί την περιστροφή.
- **Οπισθέλκουσα (Drag):** Η δύναμη που αντιστέκεται στην κίνηση.

Ο σωστός σχεδιασμός επιτρέπει στα πτερύγια να αρχίσουν να περιστρέφονται, μετατρέποντας τη κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική.

2.4.1 Μηχανική Ισχύς Ανέμου

Η μηχανική ενέργεια ή ισχύς εντός του ρότορα οφείλεται στη δύναμη του ανέμου δημιουργώντας μια ροπή στρέψης (δύναμη περιστροφής) που επενεργεί στις λεπίδες του. Η ποσότητα της ενέργειας που μεταφέρεται από τον άνεμο στον δρομέα μιας ανεμογεννήτριας καθορίζεται από τρεις κρίσιμους φυσικούς παράγοντες: την πυκνότητα του αέρα, την επιφάνεια σάρωσης των πτερυγίων και την ταχύτητα του ανέμου.

Βάσει αυτών των κρίσιμων στοιχείων η μηχανική ισχύς του ανέμου είναι:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 [W]$$

Από αυτή την εξίσωση είναι αντιληπτό πως η ισχύς είναι:

- Ανάλογη της πυκνότητας ρ του αέρα σε κανονικές συνθήκες πίεσης.
- Ανάλογη της επιφάνειας σάρωσης A
- Και ανάλογη της τρίτης δύναμης της ταχύτητας του ανέμου V .

Πρέπει να γίνει αντιληπτό πως η μηχανική ισχύς του ανέμου από το ρότορα έως το τελικό στάδιο παραγωγής της ηλεκτρικής ισχύος δεν μπορεί να είναι ιδανική διότι υπάρχουν απώλειες μηχανικές και ηλεκτρικές. Με αυτό τον παράγοντα θα πρέπει να γίνει αντιληπτό ο τρόπος λειτουργίας των ανεμογεννητριών.

Αυτά τα χαρακτηριστικά σχετίζονται με:

1. Την αλληλεπίδραση του ανέμου με τη μηχανική ισχύ της ανεμογεννήτριας (βαθμός απόδοσης).
2. Τις καταστάσεις λειτουργίας της ανεμογεννήτριας.
3. Και τους βασικούς συντελεστές και μεγέθη που την χαρακτηρίζουν.

2.4.2 Βαθμός απόδοσης

Ο βαθμός απόδοσης ή ο συντελεστής αεροδυναμικής (C_p) προσδιορίζει το ποσοστό του ανέμου που εκμεταλλεύεται η πτερωτή της αιολικής μηχανής. Η πραγματική ισχύς (P_R) που συλλέγεται είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τη μηχανική ισχύς του ανέμου και συνεπώς ορίζεται, ο συντελεστής απόδοσης:

$$C_p = P_R / P$$

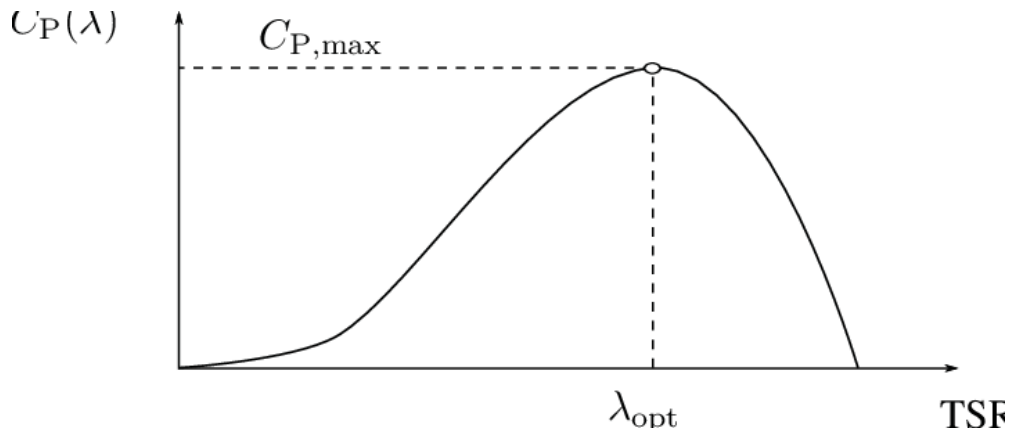
Με την σημερινή τεχνολογία, η μέγιστη δυνατή τιμή του συντελεστή αεροδυναμικής είναι 59,3%. Το όριο αυτό ονομάζεται **όριο Betz** και αυτό το όριο δηλώνει πως ο δρομέας δεν μπορεί να υπερβεί αυτό το όριο, καθώς η ταχύτητα εξόδου του αέρα δεν μπορεί να είναι μηδενική.

Αυτό οφείλεται στις απώλειες που εμφανίζονται και αυτές είναι:

- Τριβών των μορίων του αέρα.
- Στροβιλισμών.
- Μηχανικών απωλειών στο κιβώτιο ταχυτήτων (απόδοση 90 – 95%) και στη γεννήτρια (50 – 80%).

Για να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση ($C_{p,max}$), η ανεμογεννήτρια πρέπει να λειτουργεί στο βέλτιστο λόγο ταχύτητας (λ_{opt}). Αυτό απαιτεί τη συνεχή προσαρμογή της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα (ω_{mech}) ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου (V_w) (Εικόνα 2.4):

$$\lambda_{opt} = \frac{\omega_{mech} \cdot r}{V_w} \Rightarrow \omega_{mech} = \lambda_{opt} \cdot \frac{V_w}{r}$$

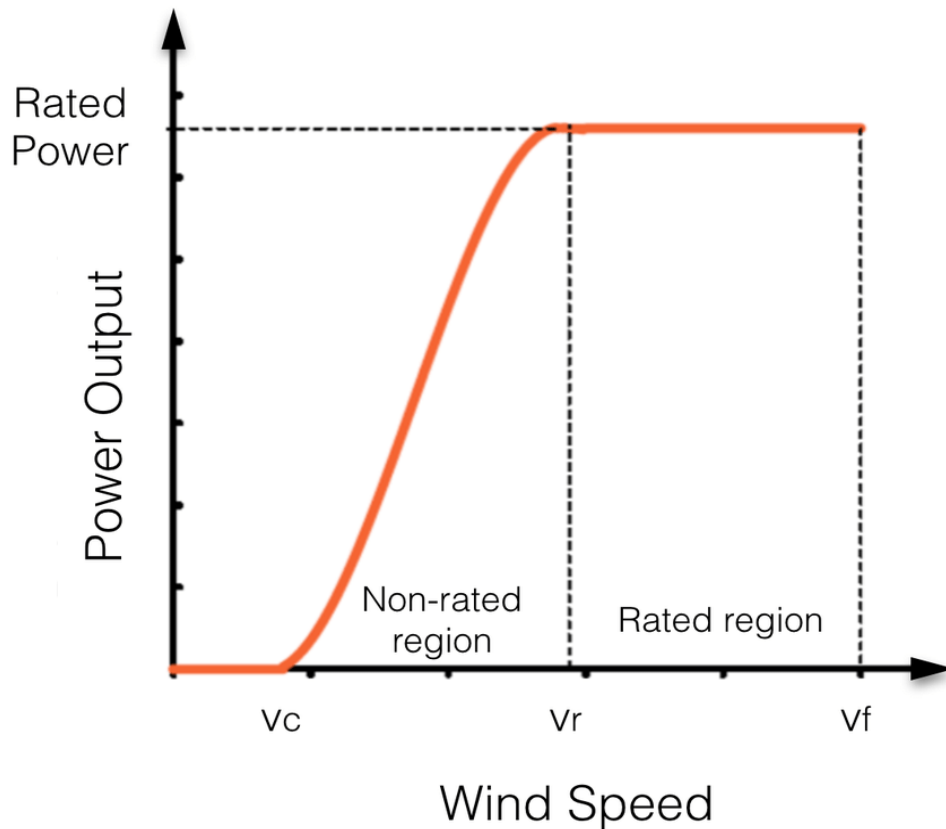


Εικόνα 2.4: Χαρακτηριστική καμπύλη Βαθμού απόδοσης συναρτήσει λόγου ταχυτήτων

Με αυτό τον τρόπο για κάθε V_w αποδίδεται η μέγιστη μηχανική ισχύς ($P_{μηχ,max}$)

Η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της ατράκτου παρουσιάζεται από την καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας, όπου προσδιορίζεται είτε θεωρητικά είτε με δοκιμές οι οποίες γίνονται σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές. Για να αναλυθεί η καμπύλη ισχύος (Εικ. 2.5) ορίζονται οι εξής παράμετροι όπως:

- Ταχύτητα κατωφλίου εισόδου (V_c): αποτελεί την ταχύτητα του ανέμου που η γεννήτρια αρχίζει να παράγει καθαρή ισχύ και είναι μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για την εκκίνηση της έλικας.
- Ταχύτητα κατωφλίου εξόδου (V_f): είναι η ταχύτητα του ανέμου που η γεννήτρια παράγει ισχύ με ελαττωμένο μηχανικό και αεροδυναμικό φορτίο και άνευ ηλεκτρικών απωλειών.
- Εκτιμητέα ισχύς (P_r): ορίζεται ως η μέγιστη και συνεχής ισχύς εξόδου της γεννήτριας (χωρίς απώλειες).
- Εκτιμητέα ταχύτητα (V_r): η ταχύτητα του ανέμου που παράγει την εκτιμητέα ισχύ.



Εικόνα 2.5: Καμπύλη ισχύος Ανεμογεννήτριας

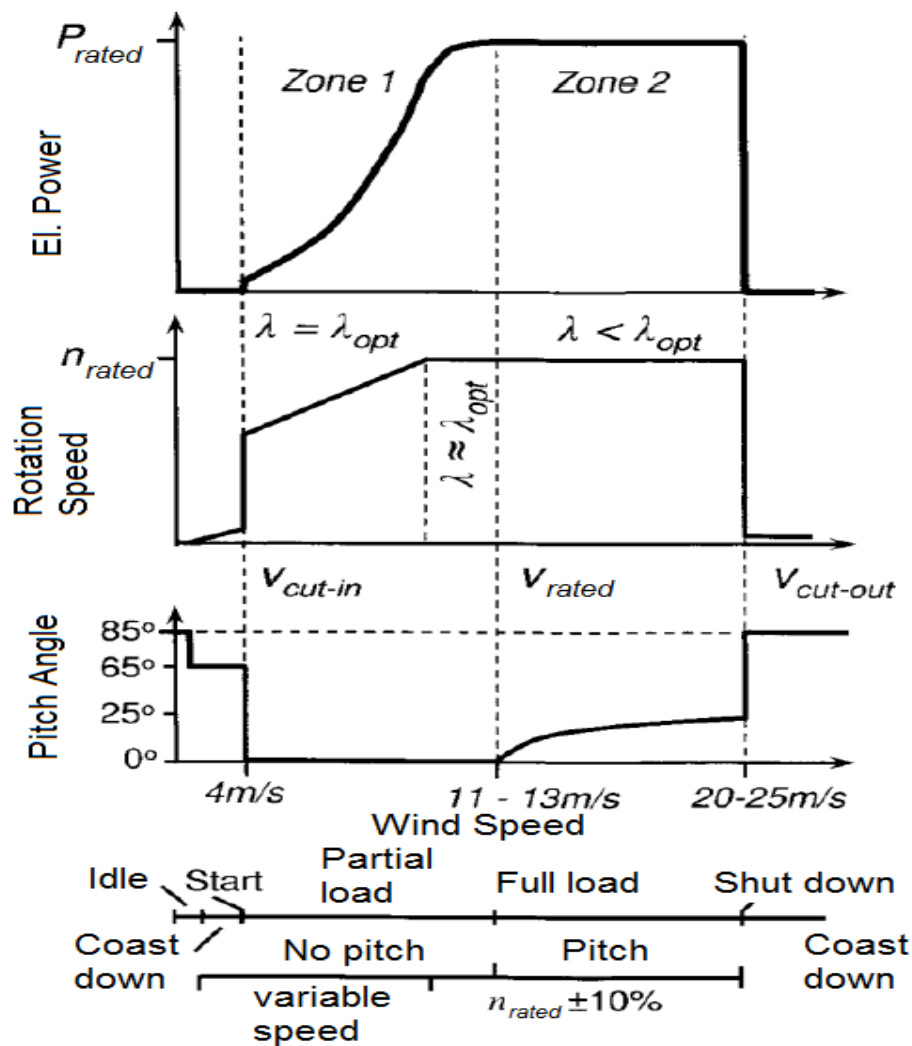
Σύμφωνα με τα παραπάνω, διαπιστώνεται ότι για κάθε V_w κάθε καμπύλη ισχύος (power curve) έχει ένα μέγιστο σημείο λειτουργίας (Maximum Power Point ή MPP) στο οποίο $\lambda = \lambda_{\text{optimum}}$. Μια ακόμα παρατήρηση σχετίζεται με το γεγονός ότι για να αποδίδεται μέγιστο $P_{\text{μηχ}}$ και λ_{opt} για κάθε V_w , θα πρέπει να έχει συγκεκριμένη γωνιακή ταχύτητα $\omega_{\text{μηχ}}$.

2.4.3 Καταστάσεις Λειτουργίας

Παρατηρώντας και αναλύοντας την Εικόνα 2.6 παρουσιάζει τις περιοχές λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας και μεταβλητού βήματος (variable speed, variable pitch), συσχετίζοντας την ταχύτητα του ανέμου (Wind Speed) με τρεις βασικές παραμέτρους: την ηλεκτρική ισχύ (El. Power), την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα (Rotation Speed) και τη γωνία βήματος των πτερυγίων (Pitch Angle).

Από τις γραφικές παραστάσεις σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου φαίνονται τα εξής:

- i. Για $V_w \leq V_{\text{cut-in}} = 4\text{m/s}$ η λειτουργία της Α/Γ , για τιμές κάτω των 4m/s βρίσκεται σε στάση και μόλις η ταχύτητα του ανέμου είναι ίση με 4m/s τότε γίνεται η εκκίνηση. Η ταχύτητα του ανέμου είναι πολύ χαμηλή για να παραχθεί ωφέλιμη ηλεκτρική ενέργεια. Τα πτερύγια βρίσκονται σε μεγάλη γωνία βήματος ($65^\circ - 85^\circ$) για να ελαχιστοποιούνται οι αεροδυναμικές δυνάμεις (furl/feather position) ή για να βοηθήσουν στην εκκίνηση (start).
- ii. Όταν η $V_{\text{cut-in}} < V_w < V_{\text{rated}}$ κυμαίνεται σε αυτό το διάστημα η Α/Γ προσπαθεί να μεγιστοποιήσει την αεροδυναμική της απόδοση. Αρχικά η ισχύς αυξάνεται εκθετικά (λόγω της σχέσης με την ταχύτητα του ανέμου υψωμένη στο κύβο V_w^3) μέχρι να φτάσει την ονομαστική της τιμή. Η ταχύτητα περιστροφής αυξάνεται γραμμικά με την ταχύτητα του ανέμου, ώστε ο λόγος ταχύτητας άκρου πτερυγίου (Tip Speed Ratio - TSR) να διατηρείται σταθερός στην βέλτιστη τιμή του ($\lambda = \lambda_{\text{opt}}$). Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ο μέγιστος συντελεστής ισχύος ($C_p = C_{p,\text{max}}$). προς το τέλος της ζώνης, η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας πλησιάζει την ονομαστική τιμή (n_{rated}).
- iii. Στο στάδιο που $V_{\text{rated}} < V_w < V_{\text{cut-out}}$ η ισχύς και η ταχύτητα περιστροφής διατηρούνται σταθερές στις ονομαστικές του τιμές για την αποφυγή μηχανικών και ηλεκτρικών καταπονήσεων. Σε αυτό το σημείο ο λόγος ταχύτητας στο άκρο του πτερυγίου είναι μικρότερος από τη βέλτιστη τιμή ($\lambda < \lambda_{\text{opt}}$). Μαζί με αυτό ενεργοποιείται και το Pitch Control. Καθώς η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται πάνω από το ονομαστικό, η γωνία βήματος αυξάνεται σταδιακά (τα πτερύγια στρίβουν ως προς τη ροή του αέρα) με σκοπό να μειωθεί η αεροδυναμική άνωση και να απορριφθεί η πλεονάζουσα ενέργεια του ανέμου
- iv. Τέλος, όταν $V_{\text{cut-out}} < V_w$ τότε ο άνεμος είναι επικίνδυνα ισχυρός. Για λόγους ασφαλείας η Α/Γ παύει να παράγει ενέργεια, τα πτερύγια στρέφονται πλήρως στις 85° (aerodynamic braking) και ο δρομέας της γεννήτριας αδρανοποιείται.



Εικόνα 2.6: Χαρακτηριστική Καμπύλη Ισχύος, Ταχύτητας Περιστροφής, Pitch Control σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου

2.4.4 Κατανομή Weibull

Η κατανομή Weibull (Βάμπουλ) είναι μία από τις πιο σημαντικές και ευέλικτες συνεχείς κατανομές πιθανότητας στη στατιστική. Χρησιμοποιείται ευρύτατα στην μηχανική αξιοπιστίας, στην ανάλυση επιβίωσης και, φυσικά, στην αιολική ενέργεια για την περιγραφή της ταχύτητας του ανέμου.

Στα αιολικά πάρκα, η κατανομή Weibull είναι το απόλυτο «εργαλείο» για τη στατιστική ανάλυση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής. Επειδή ο άνεμος δεν πνέει ποτέ σταθερά, δεν αρκεί μόνο η μέση ταχύτητά του αλλά πρέπει να μελετηθεί και πόσες ώρες το χρόνο πνέει με την κάθε ταχύτητα.

Έτσι, η κατανομή Weibull μάς δείχνει τη συχνότητα εμφάνισης της κάθε ταχύτητας ανέμου.

Το μαθηματικό της μοντέλο που περιγράφει την κατανομή Weibull είναι η εξής:

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

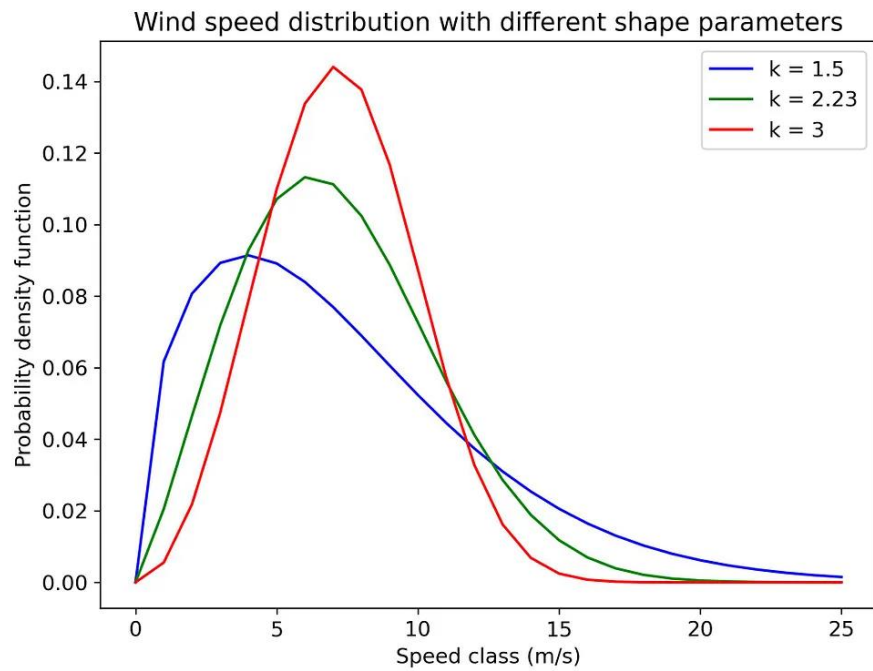
Όπου:

- u : Η ταχύτητα του ανέμου (m/s).
- k : Παράμετρος μορφής. Είναι μία αδιάστατη παράμετρος ($k > 0$) που καθορίζει τη μορφή, την κλίση και τη γεωμετρία της καμπύλης. Στην εξίσωση δείχνει πόσο σταθερός ή ευμετάβλητος είναι ο άνεμος στην τοποθεσία. Για κάθε τιμή της k ισχύει και η αντίστοιχη περίπτωση (Εικ. 2.7):
 - Αν $k \approx 1,5$ η καμπύλη παρουσιάζει μεγάλη διασπορά, που σημαίνει ότι ο άνεμος έχει μεγάλες και συχνές μεταβολές.
 - Αν $k \approx 2$ είναι η πιο συνηθισμένη τιμή για τα αιολικά.
 - Αν $k \geq 3$ η χαρακτηριστική καμπύλη στενεύει και μοιάζει με Κανονική κατανομή. Αυτό σημαίνει ότι ο άνεμος είναι πολύ σταθερός και πνέει σχεδόν πάντα γύρω από μια συγκεκριμένη μέση ταχύτητα.
- c : Παράμετρος κλίμακας. Είναι μία παράμετρος με μονάδες αντίστοιχες της ταχύτητας (m/s), η οποία σχετίζεται άμεσα με τη μέση ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή. Καθορίζει τη μετατόπιση της καμπύλης κατά μήκος του οριζόντιου άξονα (Εικ. 2.8). Για κάθε τιμή της c ισχύει και η αντίστοιχη περίπτωση:
 - Αν η c έχει υψηλή τιμή (8,5 – 9 m/s) σημαίνει ότι η τοποθεσία έχει πολύ πλούσιο αιολικό δυναμικό. Η καμπύλη μετατοπίζεται προς τα δεξιά, αυξάνοντας τις πιθανότητες για μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου.
 - Αν η c είναι μικρή σημαίνει πως η περιοχή έχει ασθενείς ανέμους και η καμπύλη μπορεί να ξεκινάει κοντά στο μηδέν.

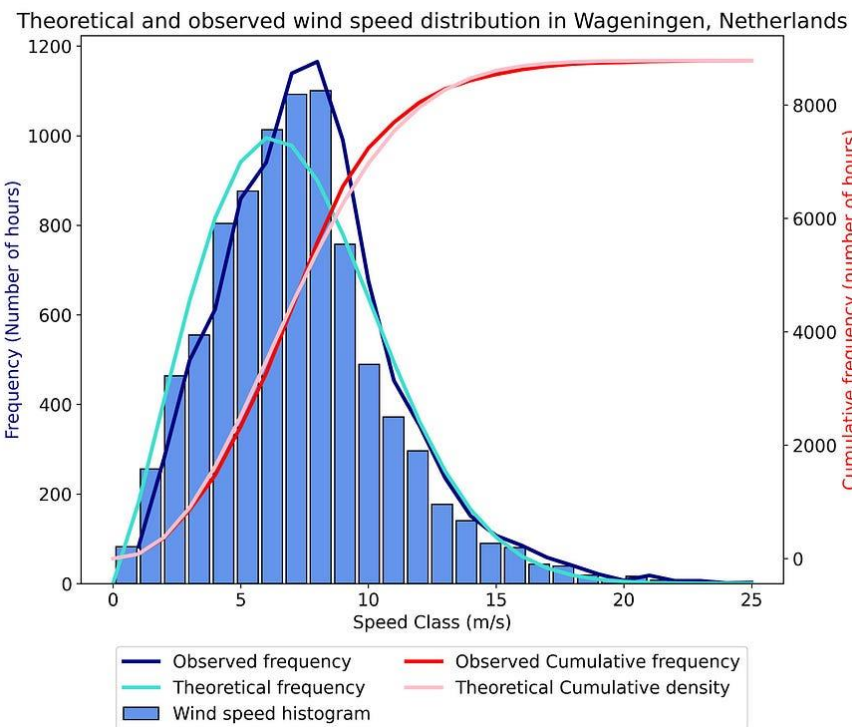
Σχεδιάζοντας τη συνάρτηση $f(u)$ σε ένα διάγραμμα (Εικ. 2.7) παρατηρείται ότι:

- Μεταβάλλοντας το c , η καμπύλη μετακινείται δεξιά – αριστερά πάνω στον άξονα ταχυτήτων.
- Μεταβάλλοντας το k , για μικρές τιμές η καμπύλη γίνεται πιο πλατιά και χαμηλή και για μεγάλες τιμές στενή και ψηλή.

Από την κατανομή Weibull μπορεί να υπολογιστεί και η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γνωρίζοντας τη μέση ταχύτητα του ανέμου. Αν η καμπύλη είναι μετατοπισμένη προς τα δεξιά, τότε η καμπύλη συμπίπτει με την μέγιστη απόδοση της καμπύλης ισχύος της A/Γ , μεγιστοποιώντας τα έσοδα του πάρκου.



Εικόνα 2.7: Κατανομή Weibull για μεταβλητές τιμές του k



Εικόνα 2.8: Κατανομή Weibull και καμπύλη ισχύος με τις παραμέτρους c, k

2.4.5 Δείκτες Αξιολόγησης

Για την αποδοτικότητα μιας αιολικής επένδυσης εξαρτάται από τους εξής συντελεστές:

- **Capacitive factor (C. F.)** $= \frac{\text{Production/year}}{\text{Nomimal power} \cdot 8.760} \cdot 100\%$
- **Full load hours factor** $= \frac{\text{Production/year}}{\text{Nomimal power}} \cdot 100\%$
- **Availability factor** $= \frac{8.760 - \text{stop hours}}{8.760} \cdot 100\%$
- $\frac{\text{Power production}}{\text{Nomimal power}}$ (kWh/kW)

Αναλύοντας έναν προς έναν τους δείκτες ισχύουν τα εξής:

- Το **Capacitive factor** περιγράφει τον λόγο της πραγματικής ενέργειας σε σχέση με τη θεωρητικά μέγιστη, που παρουσιάζει, ως προς το χρόνο.
- Το **Full load hours factor** δηλώνει τις ώρες που θα χρειαζόταν να δουλέψει η Α/Γ στο 100% ώστε να βγει η ετήσια παραγωγή.
- Τέλος, το **Availability factor** περιγράφει το ποσοστό του χρόνου που η Α/Γ ήταν διαθέσιμη.

2.4.6 Μετάδοσης Κίνησης

Με την περιστροφή των πτερυγίων μεταφέρεται στο εσωτερικό της ατράκτου (nacelle) μέσω δύο κύριων εξαρτημάτων:

- Άξονας χαμηλής ταχύτητας: Συνδέεται απευθείας με τον ρότορα και περιστρέφεται αργά (περίπου 10-20 στροφές το λεπτό).
- Κιβώτιο ταχυτήτων (Gearbox): Επειδή η γεννήτρια χρειάζεται πολύ υψηλότερες στροφές για να παράγει ρεύμα, το κιβώτιο ταχυτήτων αυξάνει την ταχύτητα περιστροφής (π.χ. από τις 20 στις 1.500 στροφές το λεπτό).
- Επίσης, υπάρχουν και ανεμογεννήτριες Direct Drive (χωρίς κιβώτιο), οι οποίες χρησιμοποιούν ειδικές γεννήτριες που λειτουργούν σε χαμηλές στροφές.

2.4.7 Μετατροπή σε ηλεκτρισμό

Η κινητήρια μηχανή, που συντελεί στο μετασχηματισμό της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, ονομάζεται γεννήτρια. Οι γεννήτριες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες σε σύγχρονες και ασύγχρονες.

Οι σύγχρονες είναι γεννήτριες στις οποίες ο ρότορας περιστρέφεται στις ονομαστικές στροφές, σύμφωνα με όσα έχει ορίσει ο κατασκευαστής, έχοντας συγχρονιστεί με τη συχνότητα του δικτύου. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται ότι ο δρομέας διαθέτει δικό του μαγνητικό πεδίο (είτε μέσω μόνιμων μαγνητών είτε μέσω συνεχούς ρεύματος διέγερσης). Η ταχύτητα περιστροφής (n) είναι σταθερά συνδεδεμένη με τη συχνότητα (f), στα 50 Hz, μέσω του αριθμού των πόλων (p): $n = 60f / p/2$. Η μονάδα μέτρησής της είναι στροφές ανά λεπτό (rpm).

Σε αντίθεση με τις σύγχρονες, στις ασύγχρονες ή επαγωγικές γεννήτριες η ταχύτητα περιστροφής (n) είναι μεγαλύτερη από αυτή των σύγχρονων (n_s) και αυτό οφείλεται στην χαρακτηριστική καμπύλη ροπής – ταχύτητας της κινητήριας μηχανής (Εικ. 2.9). Αυτή η καμπύλη δείχνει πώς μεταβάλλεται η ροπή (M) σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα (n).

Η κατακόρυφη διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει τη **σύγχρονη ταχύτητα (n_s)**, δηλαδή την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου στο στάτη. Αυτή η γραμμή χωρίζει τη λειτουργία της μηχανής σε δύο βασικές περιοχές: τη λειτουργία ως κινητήρας (motor) και τη λειτουργία ως γεννήτρια (generator).

Παρατηρώντας τις καμπύλες και ξεκινώντας με την κατάσταση της κινητήριας μηχανής να λειτουργεί ως κινητήρας.

Αρχικά, για $n=0$ θεωρείται το σημείο εκκίνησης. Εκείνη την στιγμή η μηχανή αναπτύσσει μια αρχική ροπή εκκίνησης ($M_{εκ}$).

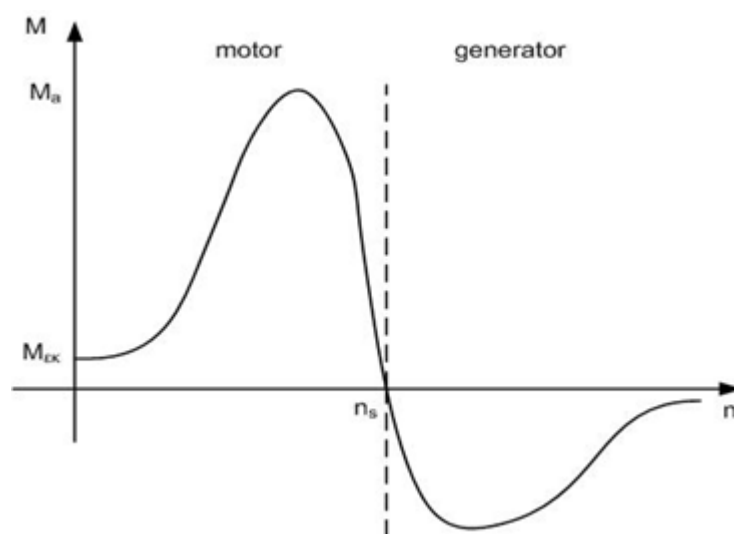
Καθώς η ταχύτητα αυξάνεται, η ροπή φτάνει στη μέγιστη της η οποία ονομάζεται ροπή ανατροπής (M_a).

Όταν ο δρομέας φτάσει τις σύγχρονες ονομαστικές στροφές ($n=n_s$) η ροπή μηδενίζεται ($M=0$). Σε αυτό το σημείο, επειδή ο δρομέας γυρίζει με την ίδια ταχύτητα, δεν υπάρχει σχετική κίνηση, δεν τέμνονται οι αγωγοί από τις μαγνητικές γραμμές, δεν επάγεται τάση εντός των τυλιγμάτων της κινητήριας μηχανής και επομένως δεν διαρρέεται από ρεύμα.

Στην περίπτωση που η ταχύτητα περιστροφής είναι μεγαλύτερη από τη σύγχρονη τότε λειτουργεί ως γεννήτρια. Αυτό οφείλεται σε εξωτερικές κινητήριες δυνάμεις (στη περίπτωση της Α/Γ είναι η ταχύτητα του ανέμου που περνάει από το κιβώτιο ταχυτήτων και καταλήγει στη μηχανή) αναγκάζει τον δρομέα να περιστρέφεται ταχύτερα από τη σύγχρονη.

Επίσης, η ροπή αλλάζει πρόσημο (γίνεται αρνητική), πράγμα που σημαίνει ότι η μηχανή δεν καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια για να παράγει έργο, αλλά λειτουργεί ως

φρένο στον στρόβιλο, μετατρέποντας τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και στέλνοντάς τη πίσω στο δίκτυο.



Εικόνα 2.9: Κατάσταση λειτουργίας κινητήριας μηχανής

Στις ανεμογεννήτριες συνήθως χρησιμοποιούνται ασύγχρονες γεννήτριες για τον εξής λόγο:

- Είναι απλές, στιβαρές και φθηνές ως προς το κόστος κατασκευής
- Είναι ανθεκτικές σε μηχανικές καταπονήσεις. (η ολίσθηση λειτουργεί ως «αμορτισέρ» στις ριπές του ανέμου)
- Έχουν χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης.

2.4.8 Ρυθμίσεις και Μετασχηματισμός

Το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από τη γεννήτρια δεν είναι ακόμη κατάλληλο για διοχετευτεί στο δίκτυο, καθώς η τάση και η συχνότητά του μπορεί να αυξομειώνονται ανάλογα με την ένταση του ανέμου.

Είναι προφανές ότι πρόκειται για γεννήτριες μεταβλητών στροφών. Αν η Ηλεκτρική Γεννήτρια (Η/Γ) είναι άμεσα συνδεδεμένη στο δίκτυο (στάτη) τότε η συχνότητα δεν θα είναι στα 50 Hz. Άρα δεν μπορεί να συνδεθεί απευθείας με το ηλεκτρικό δίκτυο. Γι' αυτό υπάρχει ανορθωτής, που μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) σε συνεχές (DC) και στη συνέχεια συνδέεται με τον αντιστροφέα ώστε να δημιουργείται AC τάση των 50 Hz για να μπορεί να συνδεθεί στο δίκτυο.

Είναι γνωστό ότι η ασύγχρονη μηχανή για να λειτουργήσει ως γεννήτρια εμφανίζει διαφορά από την σύγχρονη ταχύτητα $n_s = \frac{3000}{P/2}$ (rpm) και αυτό οφείλεται στο φαινόμενο της ολίσθησης (Εικ. 2.7). $s = \frac{n_s - n}{n_s}$ ή $\frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$. Συνήθως, $s \leq 5\%$.

Η μεταβολή της συχνότητας εξαρτάται από:

- Μεταβολή των πόλων
- Μεταβολή ταχύτητας

$$\text{Ολίσθηση: } s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100\%$$

Στη λειτουργία ως γεννήτρια η ολίσθηση είναι αρνητική επειδή $n > n_s$.

Μετά την ολοκλήρωση της μετατροπής του, το ρεύμα εισέρχεται στο μετασχηματιστή. Εκεί η πηγή τροφοδοσίας αυξάνεται από 400V στα 20kV, ώστε η ηλεκτρική ενέργεια να μπορεί να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις με ελάχιστες απώλειες. Από εκεί όλη η ενέργεια των ανεμογεννητριών ενός αιολικού πάρκου συγκεντρώνεται σε έναν υποσταθμό και συντονίζεται με το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

2.5 Τρόπος διασύνδεσης με το Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας και Βελτιστοποίηση Απόδοσης Ενέργειας

Η διασύνδεση των ανεμογεννητριών με το ηλεκτρικό δίκτυο και η βελτιστοποίηση της απόδοσής τους αποτελούν τους δύο κεντρικούς πυλώνες για την επιτυχή λειτουργία ενός αιολικού πάρκου. Ακολουθεί μια ανάλυση των τεχνικών διασύνδεσης και των μεθόδων μεγιστοποίησης της ενεργειακής παραγωγής. Η διαδικασία διασύνδεσης περιλαμβάνει τη μεταφορά της ενέργειας από την άτρακτο της ανεμογεννήτριας έως το σημείο κοινής σύνδεσης (PCC) με το εθνικό δίκτυο.

- Μετασχηματιστής Ανύψωσης (Step-up Transformer): Κάθε ανεμογεννήτρια διαθέτει έναν μετασχηματιστή (συνήθως στη βάση ή στον πυλώνα της) που μετατρέπει τη χαμηλή τάση παραγωγής (π.χ. 400 – 690V) σε Μέση Τάση (**20kV**).
- Εσωτερικό Δίκτυο Συλλογής: Οι ανεμογεννήτριες συνδέονται μεταξύ τους μέσω υπόγειων (ή υποβρύχιων) καλωδίων Μέσης Τάσης, συνήθως σε ακτινωτή διάταξη (radial) ή σε διάταξη βρόχου (loop).

- **Υποσταθμός Ανύψωσης:** Η ενέργεια συγκεντρώνεται σε έναν κεντρικό υποσταθμό, όπου μετατρέπεται σε Υψηλή Τάση (150kV ή 400kV) για τη διχοτέυσή της στο σύστημα μεταφοράς.

Ο τρόπος που η γεννήτρια συνδέεται με το δίκτυο εξαρτάται από τον τύπο της:

1. **DFIG (Doubly Fed Induction Generator):** Η πιο διαδεδομένη τεχνολογία. Επιτρέπει τη λειτουργία σε μεταβλητές στροφές, χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος που ελέγχουν τη συχνότητα και την τάση.
2. **Full Power Converters:** Όλη η παραγόμενη ισχύς περνά μέσα από μετατροπέα (AC-DC-AC), προσφέροντας πλήρη έλεγχο και καλύτερη απόκριση στις απαιτήσεις του κώδικα δικτύου (Grid Code).

Η βελτιστοποίηση στοχεύει στη μείωση των απωλειών και στη μεγιστοποίηση της απορρόφησης της ενέργειας του ανέμου.

A. Έλεγχος σε Επίπεδο Ανεμογεννήτριας

- **Έλεγχος Κλίσης Πτερυγίων (Pitch Control):** Ρύθμιση της γωνίας των πτερυγίων ώστε να διατηρείται η βέλτιστη αεροδυναμική απόδοση σε διαφορετικές ταχύτητες ανέμου και να προστατεύεται η μηχανή σε θύελλες.
- **Έλεγχος Προσανατολισμού (Yaw Control):** Διασφαλίζει ότι η ανεμογεννήτρια είναι πάντα στραμμένη "κόντρα" στον άνεμο.
- **MPPT (Maximum Power Point Tracking):** Αλγόριθμοι που προσαρμόζουν την ταχύτητα περιστροφής του ρότορα ώστε να λειτουργεί πάντα στο σημείο μέγιστης απόδοσης.

B. Έλεγχος σε Επίπεδο Αιολικού Πάρκου

- **Μείωση του Φαινομένου "Ουράς" (Wake Effect):** Όταν οι ανεμογεννήτριες είναι σε σειρά, οι πρώτες μειώνουν την ταχύτητα του ανέμου για τις επόμενες. Η βελτιστοποίηση περιλαμβάνει τη στρατηγική τοποθέτηση (layout optimization) και τον συντονισμένο έλεγχο ώστε οι μπροστινές μηχανές να "αφήνουν" περισσότερο άνεμο για τις πίσω.
- **Διαχείριση Άεργου Ισχύος:** Χρήση συστημάτων όπως τα **STATCOM** ή πυκνωτών για τη σταθεροποίηση της τάσης και τη μείωση των ηλεκτρικών απωλειών κατά τη μεταφορά.

Γ. Τεχνικές Συντήρησης και Πρόβλεψης

- **Condition Monitoring (CMS):** Χρήση αισθητήρων για την πρόβλεψη βλαβών (π.χ. στους κραδασμούς των εδράνων), αποφεύγοντας τον χρόνο εκτός λειτουργίας (downtime).

- Πρόγνωση Καιρού: Χρήση AI για την ακριβή πρόβλεψη της παραγωγής, επιτρέποντας την καλύτερη ένταξη της ενέργειας στην αγορά ηλεκτρισμού.

Περιβαλλοντικές επιπτώσεις αιολικών πάρκων

Η αιολική ενέργεια αποτελεί τον κεντρικό πυλώνα της ευρωπαϊκής στρατηγικής για την κλιματική ουδετερότητα έως το 2050. Ενώ η λειτουργία των ανεμογεννητριών (Α/Γ) έχει μηδενικές εκπομπές ρύπων, οι πρόσφατες έρευνες εστιάζουν στις έμμεσες επιπτώσεις που προκύπτουν από την κατασκευή, τη χωροθέτηση και την αποσυναρμολόγησή τους (Günay et al., 2024). Η μελέτη αυτή αναδεικνύει την ανάγκη για έναν αυστηρό περιβαλλοντικό σχεδιασμό που να εξισορροπεί την ενεργειακή απόδοση με την προστασία των τοπικών οικοσυστημάτων.

3.1 Επιπτώσεις στη Βιοποικιλότητα: Σύγχρονες Προσεγγίσεις

Η αλληλεπίδραση των αιολικών πάρκων με την πανίδα παραμένει ένα από τα πιο κρίσιμα πεδία επιστημονικής έρευνας, με νέα δεδομένα για τη συμπεριφορά των ειδών, με παρατηρούμενες επιπτώσεις, όπως:

Ορνιθοπανίδα και το "Φαινόμενο του Φραγμού": Πρόσφατες μελέτες (Kohczak, 2024) επισημαίνουν ότι πέρα από τις άμεσες προσκρούσεις, ο "εκτοπισμός λόγω ενόχλησης" (displacement) αποτελεί μείζονα απειλή. Σε περιοχές με πολλαπλά πάρκα, δημιουργείται ένας "τοίχος" που εμποδίζει τη φυσική κίνηση των πτηνών, αναγκάζοντάς τα σε δαπανηρές ενεργειακά παρακάμψεις (IUCN, 2021).

Χειρόπτερα (Νυχτερίδες): Η έρευνα μετά το 2020 αναδεικνύει το φαινόμενο του βαρυτραύματος (θάνατος λόγω απότομης αλλαγής πίεσης) ως κύρια αιτία θνησιμότητας, συχνά υποτιμημένη σε σχέση με τις προσκρούσεις.

Χερσαία Οικοσυστήματα και Κατακερματισμός: Η διάνοιξη οδικού δικτύου για τη μεταφορά των πτερυγίων σε ορεινές περιοχές προκαλεί μόνιμο κατακερματισμό των ενδιαιτημάτων. Οι συνοδές υποδομές (δρόμοι, γραμμές μεταφοράς) έχουν συχνά μεγαλύτερο οικολογικό αποτύπωμα από τις ίδιες τις Α/Γ.

3.2 Ανάλυση Κύκλου Ζωής και Ανθρακικό Αποτύπωμα

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) αποτελεί μια ολιστική μεθοδολογία ποσοτικοποίησης και αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός συστήματος. Εξετάζει κάθε φάση της «ζωής» του έργου από την απόκτηση των πρώτων υλών έως την τελική του διάθεση εντοπίζοντας τις επιβαρύνσεις όχι μόνο στην ατμόσφαιρα (εκπομπές αερίων), αλλά και στο έδαφος και τους υδάτινους πόρους.

Στην περίπτωση ενός αιολικού πάρκου, η ΑΚΖ διαρθρώνεται σε τέσσερα βασικά στάδια:

- **Προ-κατασκευαστικό Στάδιο (Upstream):** Περιλαμβάνει την εξόρυξη και επεξεργασία των απαραίτητων πρώτων υλών (όπως σίδηρος, χαλκός, αλουμίνιο και υαλονήματα), καθώς και την παραγωγή των κύριων δομικών στοιχείων. Στο στάδιο αυτό δεσπόζει η κατασκευή του χάλυβα για τον πύργο της Ανεμογεννήτριας (Α/Γ), η παραγωγή των σύνθετων υλικών για τα πτερύγια, καθώς και η παραγωγή του σκυροδέματος που απαιτείται για τη θεμελίωση της κατασκευής στο έδαφος.
- **Κατασκευή και Εγκατάσταση (On-site):** Αφορά τη μεταφορά των κύριων τμημάτων της Α/Γ (πτερύγια, πύργος, άτρακτος) στη θέση του έργου. Η διαδικασία αυτή συχνά απαιτεί εκτεταμένες εργασίες οδοποιίας και διάνοιξης δρόμων προσέγγισης, ιδιαίτερα σε ορεινά ανάγλυφα. Παράλληλα, πραγματοποιούνται οι απαραίτητες χωματουργικές εργασίες για τη διαμόρφωση των πλατειών ανέγερσης και την όδευση του εσωτερικού δικτύου Μέσης Τάσης. Το στάδιο ολοκληρώνεται με την ανέγερση των Α/Γ και την κατασκευή του Υποσταθμού Ανύψωσης Τάσης, μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η διασύνδεση του αιολικού πάρκου με το Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας.
- **Λειτουργία και Συντήρηση (Operation & Maintenance):** Αποτελεί τη μεγαλύτερη σε διάρκεια φάση του έργου (συνήθως 20 έως 25 έτη). Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, η παραγωγή ενέργειας είναι περιβαλλοντικά ουδέτερη. Οι όποιες επιπτώσεις εντοπίζονται στις προγραμματισμένες ή έκτακτες εργασίες συντήρησης (π.χ. διαχείριση χρησιμοποιημένων λιπαντικών ελαίων των συστημάτων μετάδοσης κίνησης) καθώς και στις έμμεσες εκπομπές ρύπων από τα οχήματα των συνεργείων που προσεγγίζουν το πάρκο.
- **Τέλος Κύκλου Ζωής (Decommissioning / Downstream):** Μετά την οριστική παύση λειτουργίας του έργου, πραγματοποιείται η αποξήλωση των ανεμογεννητριών και η περιβαλλοντική αποκατάσταση του χώρου εγκατάστασης. Στο πλαίσιο της διαχείρισης των αποβλήτων, ο χάλυβας και τα λοιπά μεταλλικά στοιχεία ανακυκλώνονται σε εξαιρετικά υψηλό ποσοστό. Αντίθετα, η διαχείριση και ανακύκλωση των σύνθετων υλικών των πτερυγίων (υαλονήματα/ρητίνες) παραμένει η σημαντικότερη τεχνολογική και περιβαλλοντική πρόκληση του κλάδου σήμερα.

Από την ανάλυση του κύκλου ζωής του έργου παρατηρείται πως το μεγαλύτερο ποσοστό ανθρακικού αποτυπώματος εντοπίζεται στα στάδια της παραγωγής των υλικών και της κατασκευής. Με το ποσοστό αυτό να κυμαίνεται στο 80 – 90%.

Η έντονη αυτή περιβαλλοντική επιβάρυνση οφείλεται στην υψηλή ενσωματωμένη ενέργεια (embodied energy) και τις εκπομπές που χαρακτηρίζουν τα κύρια υλικά κατασκευής των Ανεμογεννητριών (Α/Γ):

- Χάλυβας (Πύργος και Άτρακτος): Αποτελεί το βασικό δομικό υλικό της Α/Γ και η παραγωγική του διαδικασία (αναγωγή σιδηρομεταλλεύματος σε υψικαμένους) απαιτεί τεράστια ποσά θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, οδηγώντας σε υψηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.
- Σκυρόδεμα (Θεμελίωση): Χρησιμοποιείται σε μεγάλους όγκους για τη στατική επάρκεια της βάσης της Α/Γ. Η παραγωγή του κλίνκερ (βασικό συστατικό του τσιμέντου) είναι μια εξαιρετικά ενεργοβόρος διαδικασία που συνεπάγεται τη συνεπακόλουθη έκλυση μεγάλων ποσοτήτων CO₂ τόσο λόγω της καύσης όσο και λόγω της χημικής αποσύνθεσης του ασβεστόλιθου (απανθράκωση).
- Σύνθετα Υλικά (Πτερύγια): Τα πτερύγια κατασκευάζονται από πολυμερείς ρητίνες και υαλονήματα (ή ανθρακονήματα). Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν υψηλό περιβαλλοντικό κόστος κατά την παραγωγή τους, καθώς προέρχονται από σύνθετες χημικές και θερμικές κατεργασίες με βάση τα παράγωγα του πετρελαίου.

Οι μελέτες Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) δείχνουν ότι οι τυπικές τιμές του ανθρακικού αποτυπώματος για την αιολική ενέργεια διαφοροποιούνται ανάλογα με το περιβάλλον εγκατάστασης του έργου. Συγκεκριμένα:

- Χερσαία αιολικά πάρκα (Onshore): Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κυμαίνονται μεταξύ 10 – 15 gr CO₂ ανά kWh.
- Θαλάσσια αιολικά πάρκα (Offshore): Η αντίστοιχη τιμή διαμορφώνεται σε ελαφρώς χαμηλότερα επίπεδα, μεταξύ 8 – 12 gr CO₂ ανά kWh, καθώς οι ισχυρότεροι και σταθερότεροι άνεμοι στη θάλασσα εξασφαλίζουν μεγαλύτερη ετήσια παραγωγή ενέργειας, αποσβένοντας ταχύτερα το κατασκευαστικό αποτύπωμα.

3.3 Εκπομπές κατά την Κατασκευή

Έρευνα των Günay et al. (2024) δείχνει ότι:

- Το 80-90% των εκπομπών CO₂ μιας ανεμογεννήτριας προέρχεται από τα υλικά (χάλυβας, σκυρόδεμα για τις βάσεις) και τη φάση της κατασκευής.
- Παρά τις εκπομπές αυτές, η "ενεργειακή απόσβεση" (energy payback) συμβαίνει σε λιγότερο από 6-8 μήνες λειτουργίας για σύγχρονες Α/Γ μεγάλης ισχύος (άνω των 3.6 MW).

Μια αναδυόμενη πρόκληση μετά το 2022 είναι η ανακύκλωση των πτερυγίων από σύνθετα υλικά (fiberglass/carbon fiber). Η τάση πλέον στρέφεται προς την "κυκλική αιολική ενέργεια", με στόχο την 100% ανακυκλωσιμότητα των εξαρτημάτων.

3.3.1 Αισθητική Τοπίου και Κοινωνικές Επιπτώσεις

Η οπτική όχληση δεν αποτελεί πλέον μια αμιγώς υποκειμενική αντίληψη, αλλά μια μετρήσιμη παράμετρο με άμεσο αντίκτυπο στην τουριστική και πολιτιστική αξία ενός τόπου. Η αισθητική υποβάθμιση του περιβάλλοντος απορρέει από τέσσερις κεντρικούς άξονες:

- Η ασυμβατότητα κλίμακας

Πρόκειται για την πιο δραστική αισθητική παρέμβαση. Η ανθρώπινη αντίληψη ιεραρχεί το μέγεθος των στοιχείων του τοπίου συγκριτικά με οικεία πρότυπα, όπως η βλάστηση ή το κτισμένο περιβάλλον. Όταν μια σύγχρονη ανεμογεννήτρια, ύψους 150-200 μέτρων, δεσπόζει σε μια κορυφογραμμή, ο ακατάλληλος συσχετισμός μεγεθών την καθιστά το κυρίαρχο σημείο αναφοράς, επισκιάζοντας τη φυσική γεωμετρία και το επιβλητικό ανάγλυφο του βουνού.

- Η διατάραξη της οπτικής ηρεμίας

Τα φυσικά οικοσυστήματα γίνονται αντιληπτά ως τόποι σταθερότητας και γαλήνης. Η εισαγωγή των ανεμογεννητριών και η συνεχής, περιοδική κίνηση των πτερυγίων τους δημιουργούν μια τεχνητή οπτική δυναμική. Αυτός ο διαρκής «θόρυβος» στην κίνηση μαγνητίζει αναπόφευκτα το βλέμμα του παρατηρητή, διασπώντας την αίσθηση ηρεμίας που προσφέρει η επαφή με το αδιατάρακτο φυσικό περιβάλλον.

- Η απώλεια της φυσικής αυθεντικότητας

Για τις τοπικές κοινωνίες, το ορεινό ή παράκτιο ανάγλυφο αποτελεί φορέα ταυτότητας, άρρηκτα συνδεδεμένο με την έννοια της ανέγγιχτης φύσης. Η εγκατάσταση αιολικών πάρκων μεταλλάσσει την οπτική ταυτότητα του τόπου, μετατρέποντας ένα φυσικό

οικοσύστημα σε ζώνη βιομηχανικής δραστηριότητας, γεγονός που συχνά οδηγεί σε μια αίσθηση αλλοίωσης του φυσικού κάλλους.

- Η χωρική ένταξη και τα συνοδά έργα

Η αισθητική αποδοχή εξαρτάται άμεσα από τη χωροθέτηση των ανεμογεννητριών. Μια διάταξη που ακολουθεί με αρμονία τις καμπύλες του εδάφους είναι αισθητικά προτιμότερη από μια άναρχη τοποθέτηση που φαίνεται να επιβάλλεται επιθετικά στο τοπίο. Επιπλέον, το οπτικό αποτύπωμα δεν περιορίζεται στις ανεμογεννήτριες· τα συνοδά έργα —όπως η εκτεταμένη οδοποιία στις πλαγιές για τη διέλευση των βαρέων οχημάτων και το δίκτυο των πυλώνων μεταφοράς— προκαλούν συχνά μόνιμες «ουλές» στο φυσικό περιβάλλον, οι οποίες μπορεί να είναι εξίσου, αν όχι περισσότερο, οχληρές από τις ίδιες τις κατασκευές.

3.4 Τεχνολογίες Μετριασμού (Mitigation Hierarchy)

Ως τεχνολογία μετριασμού ονομάζεται κάθε τεχνολογική λύση, εφαρμογή ή πρακτική που αναπτύσσεται με σκοπό τη μείωση, την πρόληψη ή την εξάλειψη των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, καθώς και τον περιορισμό των αρνητικών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής.

Ο όρος χρησιμοποιείται κατά κόρον στις περιβαλλοντικές επιστήμες, την ενέργεια και τη μηχανική και διαφοροποιείται από την προσαρμογή, καθώς ο μετριασμός στοχεύει στην αιτία του προβλήματος και όχι απλά στη διαχείριση των συνέπειών του.

Στα αιολικά πάρκα, ο όρος αποκτά διττή σημασία. Από τη μία πλευρά, η ίδια η αιολική ενέργεια αποτελεί μια κορυφαία τεχνολογία μετριασμού της κλιματικής αλλαγής. Από την άλλη, κατά τη φάση σχεδιασμού, κατασκευής και λειτουργίας ενός αιολικού πάρκου, εφαρμόζονται εξειδικευμένες τεχνολογίες για τον μετριασμό των δικών του περιβαλλοντικών και τεχνικών επιπτώσεων (π.χ. στο οικοσύστημα, το ηλεκτρικό δίκτυο ή την τοπική κοινωνία).

Η εφαρμογή της ιεραρχίας μετριασμού (Αποφυγή - Ελαχιστοποίηση - Αποκατάσταση) ενισχύεται πλέον σημαντικά από τεχνολογίες αιχμής, με κυριότερες τις εξής:

- Έξυπνα Συστήματα Επιτήρησης DTBird & IdentiFlight, στα οποία μέσω Τεχνητής Νοημοσύνης και με κάμερες ραντάρ υψηλής ευκρίνειας. Πραγματοποιούν ανίχνευση προστατευόμενων ειδών ορνιθοπανίδας σε πραγματικό χρόνο, δίνοντας εντολή για ακαριαία παύση των πτερυγίων (automated curtailment) όταν εντοπιστεί κίνδυνος σύγκρουσης.

- Ακουστικοί Απωθητές Υπερήχων (Acoustic Deterrents) Εξειδικευμένες συσκευές που εκπέμπουν υπερήχους στην πλήμνη της ανεμογεννήτριας, απομακρύνοντας με ασφάλεια τις νυχτερίδες (χειρόπτερα) από τη ζώνη περιστροφής των πτερυγίων.
- Βαφή Πτερυγίων: Πρόσφατα πειραματικά δεδομένα υποδεικνύουν ότι η βαφή ενός εκ των τριών πτερυγίων με μαύρο χρώμα αυξάνει την ορατότητα της κατασκευής για τα πτηνά, μειώνοντας τη θνησιμότητα έως και 70% (motion smear reduction).

Με τις τεχνολογίες μετριασμού μετατρέπουν ένα αιολικό πάρκο από μια απλή μονάδα παραγωγής ενέργειας σε ένα έξυπνο, οικολογικά ισορροπημένο και τεχνικά ώριμο σύστημα, ικανό να ελαχιστοποιεί το τοπικό του αποτύπωμα ενώ μεγιστοποιεί το παγκόσμιο περιβαλλοντικό του όφελος.

3.5 Οικονομική και Κοινωνική Διάσταση των Αιολικών Επενδύσεων

Η μετάβαση στην αιολική ενέργεια δεν είναι μόνο ένα τεχνικό ή περιβαλλοντικό ζήτημα, αλλά μια σύνθετη εξίσωση που αναδιαμορφώνει την οικονομική δομή και την κοινωνική συνοχή των τοπικών κοινωνιών.

Η εγκατάσταση αιολικών πάρκων επηρεάζει την οικονομία σε εθνικό και τοπικό επίπεδο, δημιουργώντας τόσο ευκαιρίες όσο και σημεία τριβής. Αυτά είναι:

1. Άμεσες και Έμμεσες Θέσεις Εργασίας

Η κατασκευή και η λειτουργία αιολικών σταθμών δημιουργεί θέσεις εργασίας σε διάφορους τομείς:

- **Φάση Κατασκευής:** Υψηλή ζήτηση για τεχνικό προσωπικό, χωματουργικές εργασίες και μεταφορές.
- **Φάση Λειτουργίας:** Μόνιμες θέσεις για συντήρηση και φύλαξη, αν και αριθμητικά λιγότερες από τη φάση κατασκευής.
- **Πολλαπλασιαστικό Όφελος:** Η παρουσία προσωπικού ενισχύει την τοπική αγορά (εστίαση, στέγαση) σε απομακρυσμένες περιοχές.

2. Τοπικά Ανταποδοτικά Οφέλη και Φορολογία

Σύμφωνα με το ελληνικό νομοθετικό πλαίσιο, ένα ποσοστό του τζίρου των αιολικών πάρκων (συνήθως 3%) επιστρέφει στην τοπική αυτοδιοίκηση και στους καταναλωτές, μέσω:

- **Μείωσης Λογαριασμών Ρεύματος:** Πίστωση στους λογαριασμούς των κατοίκων των κοινοτήτων όπου φιλοξενούνται οι Α/Γ.

- **Έργων Υποδομής:** Χρηματοδότηση τοπικών έργων (οδοποιία, φωτισμός) μέσω των δήμων.

3. Σύγκρουση με τον Τουρισμό και την Αξία της Γης

Μια κρίσιμη οικονομική περίπτωση, ειδικά για περιοχές όπως η Κρήτη, είναι η πιθανή αρνητική επίδραση στον τουρισμό. Η αλλοίωση του "παρθένου" τοπίου μπορεί να επηρεάσει εναλλακτικές μορφές τουρισμού (π.χ. ορειβασία, οικοτουρισμός), μειώνοντας την ελκυστικότητα ορισμένων προορισμών.

3.5.1 Κοινωνικές Επιπτώσεις και Αποδοχή

Η κοινωνική αποδοχή αποτελεί τον "ρυθμιστή" για την επιτυχία κάθε ενεργειακού έργου. Χωρίς την κοινωνική συναίνεση, τα έργα συχνά οδηγούνται σε δικαστικές διαμάχες και καθυστερήσεις.

1. Το Φαινόμενο NIMBY (Not In My Back Yard)

Παρόλο που η πλειονότητα των πολιτών τάσσεται υπέρ των ΑΠΕ σε εθνικό επίπεδο, παρατηρείται έντονη αντίδραση όταν τα έργα προτείνονται "στην αυλή τους". Οι λόγοι περιλαμβάνουν:

- Φόβο για την υποβάθμιση της ποιότητας ζωής (θόρυβος, οπτική όχληση).
- Έλλειψη ενημέρωσης και συμμετοχής στη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

2. Ενεργειακή Δημοκρατία και Κοινότητες

Η τάση μετά το 2020 επικεντρώνεται στις **Ενεργειακές Κοινότητες**. Πρόκειται για σχήματα όπου οι ίδιοι οι πολίτες γίνονται συνιδιοκτήτες των αιολικών πάρκων. Αυτό μετατρέπει την κοινωνική αντίδραση σε συμμετοχή, καθώς τα κέρδη παραμένουν εξ ολοκλήρου στην τοπική κοινωνία, ενισχύοντας την ενεργειακή δικαιοσύνη.

3. Επιπτώσεις στην Υγεία και την Ψυχολογία

Η επιστημονική συζήτηση για το "Σύνδρομο της Ανεμογεννήτριας" (Wind Turbine Syndrome) συνεχίζεται. Ενώ δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία για άμεσες παθολογικές βλάβες, η **ψυχοακουστική όχληση** και το άγχος που προκαλείται από την αλλαγή του οικείου περιβάλλοντος είναι υπαρκτά κοινωνικά φαινόμενα που πρέπει να αντιμετωπιστούν με ειλικρινή διάλογο.

3.5.2 Σύνθεση: η "Πράσινη" Εξίσωση

Η ισορροπία μεταξύ οικονομίας και περιβάλλοντος μπορεί να εκφραστεί μέσω της Ανάλυσης Κόστους-Οφέλους, όπου συμπεριλαμβάνονται οι **εξωτερικές οικονομίες** (externalities). Για παράδειγμα, το κόστος εγκατάστασης ενός αιολικού πάρκου αντισταθμίζεται από τη μείωση του κόστους δημόσιας υγείας που θα προκαλούσε η ρύπανση από ένα εργοστάσιο λιγνίτη.

3.6 Θεσμικό Πλαίσιο και Στρατηγικός Σχεδιασμός Χωροθέτησης Αιολικών Σταθμών

Η ανάπτυξη αιολικών πάρκων διέπεται από ένα αυστηρό σύνολο κανόνων που στοχεύουν στην εξισορρόπηση της ενεργειακής αποδοτικότητας με την προστασία του φυσικού κεφαλαίου. Η διαδικασία περιλαμβάνει διαδοχικά στάδια αδειοδότησης και συμμόρφωση με χωροταξικούς περιορισμούς, διασφαλίζοντας τη νομιμότητα και τη βιωσιμότητα των επενδύσεων. Η διαδικασία αδειοδότησης στην Ελλάδα είναι πλέον ψηφιοποιημένη και αυστηρά χρονοδιαγραμματική. Η επιτυχία ενός αιολικού πάρκου εξαρτάται από την ποιότητα του αρχικού χωροταξικού σχεδιασμού και την πλήρη εναρμόνιση με τους περιβαλλοντικούς όρους που θέτει το κράτος. Ο σωστός σχεδιασμός είναι αυτός που ελαχιστοποιεί τις κοινωνικές αντιδράσεις και προστατεύει τη βιοποικιλότητα χωρίς να θυσιάζει την ενεργειακή παραγωγή.

Ο σχεδιασμός ενός αιολικού πάρκου ξεκινά από την ανάλυση του **Ειδικού Πλαισίου Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις ΑΠΕ**.

Σύμφωνα με τους **Arvaniti & Koumantas (2025)**, η χωροθέτηση απαγορεύεται αυστηρά σε:

- **Πυρήνες Εθνικών Δρυμών** και Μνημεία Παγκόσμιας Πολιτιστικής Κληρονομιάς (UNESCO).
- **Περιοχές εντός σχεδίου πόλεως** και οικισμούς (με καθορισμένες αποστάσεις ασφαλείας για την αποφυγή ηχορύπανσης και shadow flicker).
- **Κρίσιμα ενδιαιτήματα** προστατευόμενων ειδών, όπως αυτά ορίζονται από το δίκτυο Natura 2000, εκτός αν η Ειδική Οικολογική Αξιολόγηση αποδείξει τη μη διατάραξη της ακεραιότητας της περιοχής.

Το καταστατικό πλαίσιο ορίζει περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό όπου η εγκατάσταση ενθαρρύνεται, υπό την προϋπόθεση ότι δεν ξεπερνιέται η **"φέρουσα ικανότητα"** του τοπίου (ο μέγιστος επιτρεπτός αριθμός ανεμογεννητριών ανά ΟΤΑ).

Η Διαδικασία Αδειοδότησης (Licensing Lifecycle)

Η μετάβαση από τον σχεδιασμό στην υλοποίηση απαιτεί μια πολυεπίπεδη αλληλουχία αδειών, η οποία απλοποιήθηκε σημαντικά με τον **Νόμο 4685/2020**.

A Βεβαίωση Παραγωγού (Πρώην Άδεια Παραγωγής)

Εκδίδεται από τη Ρυθμιστική Αρχή Αποβλήτων, Ενέργειας και Υδάτων (ΡΑΕΥ).

Αποτελεί την "ταυτότητα" του έργου και εξετάζει:

- Τη διαθεσιμότητα του χώρου (μη επικάλυψη με άλλα έργα).
- Τη σύννομη χωροθέτηση βάσει των αποκλεισμών που προαναφέρθηκαν.

B Περιβαλλοντική Αδειοδότηση

Αυτή είναι η κρισιμότερη φάση για το περιβάλλον. Απαιτείται η σύνταξη **Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ)**, η οποία αξιολογεί:

- Τις επιπτώσεις στη χλωρίδα, την πανίδα και το τοπίο.
- Τις προτεινόμενες μεθόδους μετριασμού (π.χ. συστήματα αποτροπής πρόσκρουσης πτηνών).

Η διαδικασία καταλήγει στην έκδοση της **Απόφασης Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΑΕΠΟ)**.

Γ Προσφορά Σύνδεσης και Άδεια Εγκατάστασης

- **Οριστική Προσφορά Σύνδεσης:** Χορηγείται από τον διαχειριστή του δικτύου (ΑΔΜΗΕ ή ΔΕΔΔΗΕ) και καθορίζει τον τρόπο σύνδεσης του πάρκου με το ηλεκτρικό σύστημα.
- **Άδεια Εγκατάστασης:** Απαιτεί την προηγούμενη εξασφάλιση της χρήσης γης (π.χ. μίσθωση δημόσιας ή ιδιωτικής έκτασης) και την έγκριση των τεχνικών μελετών.

Τεχνικός Σχεδιασμός και Περιβαλλοντικοί Περιορισμοί

Ο σχεδιασμός της διάταξης των ανεμογεννητριών (micro-siting) δεν ακολουθεί μόνο κριτήρια απόδοσης, αλλά και θεσμικούς περιορισμούς:

1. **Αποστάσεις από Ακτή:** Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην οπτική επαφή με τουριστικές ζώνες.

2. **Δασικές Εγκρίσεις:** Απαιτείται πράξη χαρακτηρισμού και έγκριση επέμβασης από τις δασικές υπηρεσίες, με υποχρέωση αναδάσωσης ισόποσης έκτασης.
3. **Αρχαιολογικές Εγκρίσεις:** Σύμφωνα γνώμη των κατά τόπους Εφορειών Αρχαιοτήτων.

3.6.1 Χωροταξικοί Περιορισμοί και Νομοθετικό Πλαίσιο Αιολικών Εγκαταστάσεων στην Ελλάδα σε Περιοχές βάσει Natura 2000

Στην Ελλάδα, ο σχεδιασμός και η χωροθέτηση των αιολικών πάρκων διέπονται από ένα αυστηρό πλέγμα νομοθεσίας που στοχεύει στην προστασία, τόσο του ανθρωπογενούς περιβάλλοντος (οικισμοί), όσο και των οικολογικά ευαίσθητων περιοχών (Natura 2000).

Παρόλο που ο όρος «οικισμοί τύπου Natura» δεν υφίσταται ως αυτόνομος νομικός ορισμός, αναφέρεται ουσιαστικά σε οικισμούς που βρίσκονται εντός ή πλησίον προστατευόμενων περιοχών. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ισχύουν **σωρευτικά** οι περιορισμοί και των δύο κατηγοριών.

Σύμφωνα με το θεσμικό πλαίσιο που αναλύεται από το ισχύον **Ειδικό Χωροταξικό Πλαίσιο για τις ΑΠΕ**, οι αποστάσεις χωροθέτησης από οικισμούς και οι περιορισμοί σε περιοχές Natura 2000 καθορίζονται με αυστηρά γεωμετρικά και οικολογικά κριτήρια, τα οποία πρέπει να στηρίζονται στα εξής νομοθετικά πλαίσια:

- **Ειδικό Χωροταξικό Πλαίσιο για τις ΑΠΕ (ΦΕΚ 2464/Β/2008):** Το θεμελιώδες κείμενο που ορίζει τις ελάχιστες αποστάσεις από οικισμούς, ακτές και μνημεία.
- **Νόμος 4685/2020 (Εκσυγχρονισμός Περιβαλλοντικής Νομοθεσίας):** Αναμόρφωσε τις ζώνες προστασίας στις περιοχές Natura 2000 και απλοποίησε την αδειοδοτική διαδικασία.
- **Νόμος 1650/1986:** Ο βασικός νόμος για την προστασία του περιβάλλοντος, στον οποίο στηρίζονται οι Μελέτες Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ).

Αποστάσεις από Οικιστικούς Ιστούς

Για την αποφυγή της οπτικής και ακουστικής όχλησης, το Ειδικό Χωροταξικό Πλαίσιο επιβάλλει τις εξής ελάχιστες αποστάσεις από τον άξονα της ανεμογεννήτριας:

- **Απλοί Οριοθετημένοι Οικισμοί:** 500 μέτρα.
- **Παραδοσιακοί Οικισμοί:** 1.000 μέτρα.

- **Πόλεις και Πολεοδομικά Συγκροτήματα:** 1.000 μέτρα.
- **Μεμονωμένες νόμιμες κατοικίες (εκτός σχεδίου):** 500 μέτρα.

Σε περιπτώσεις όπου ο οικισμός βρίσκεται εντός Natura, οι αποστάσεις αυτές παραμένουν, αλλά προστίθενται οι οικολογικοί περιορισμοί της ζώνης. Σημειώνεται ότι οι περιοχές Natura 2000 στην Ελλάδα (Ζώνες Ειδικής Προστασίας - ΖΕΠ και Ειδικές Ζώνες Διατήρησης - ΕΖΔ) δεν αποτελούν «ζώνες ολικού αποκλεισμού», αλλά περιοχές ελεγχόμενης ανάπτυξης.

Ζώνες Αποκλεισμού

Η εγκατάσταση αιολικών **απαγορεύεται ρητά** σε:

- **Πυρήνες Εθνικών Δρυμών.**
- **Περιοχές Απόλυτης Προστασίας της Φύσης** (όπως ορίζονται στα Προεδρικά Διατάγματα προστασίας).
- **Κηρυγμένα Μνημεία της Φύσης** και εθνικούς κήπους.

Ζώνες Συμβατότητας και Ειδικής Οικολογικής Αξιολόγηση

Στις υπόλοιπες εκτάσεις του δικτύου Natura 2000, η αδειοδότηση απαιτεί την υποβολή Ειδικής Οικολογικής Αξιολόγησης (ΕΟΑ). Αυτή η μελέτη είναι επιστημονικά εστιασμένη στις επιπτώσεις του συγκεκριμένου έργου στα είδη και τους οικότυπους χαρακτηρισμού της περιοχής (π.χ. επίδραση σε συγκεκριμένα προστατευόμενα πτηνά).

Φέρουσα Ικανότητα

Ο νόμος θέτει ανώτατα όρια εγκατεστημένης ισχύος ανά Δήμο ή ανά προστατευόμενη ενότητα (Φέρουσα Ικανότητα), ώστε να μην αλλοιωθεί ο χαρακτήρας του οικοσυστήματος από την μεγάλη συγκέντρωση ανεμογεννητριών.

«Απάτητα Βουνά»

Μετά το 2021, το Υπουργείο Περιβάλλοντος εισήγαγε τον θεσμό των **«Απάτητων Βουνών»** (π.χ. Λευκά Όρη στην Κρήτη, Ταΰγετος, Σάος). Σε αυτές τις περιοχές, οι οποίες είναι κατά κανόνα Natura, απαγορεύεται η διάνοιξη νέων δρόμων και η κατασκευή πλατειών για ανεμογεννήτριες, θέτοντας ένα επιπλέον στρώμα προστασίας πάνω από το υφιστάμενο χωροταξικό.

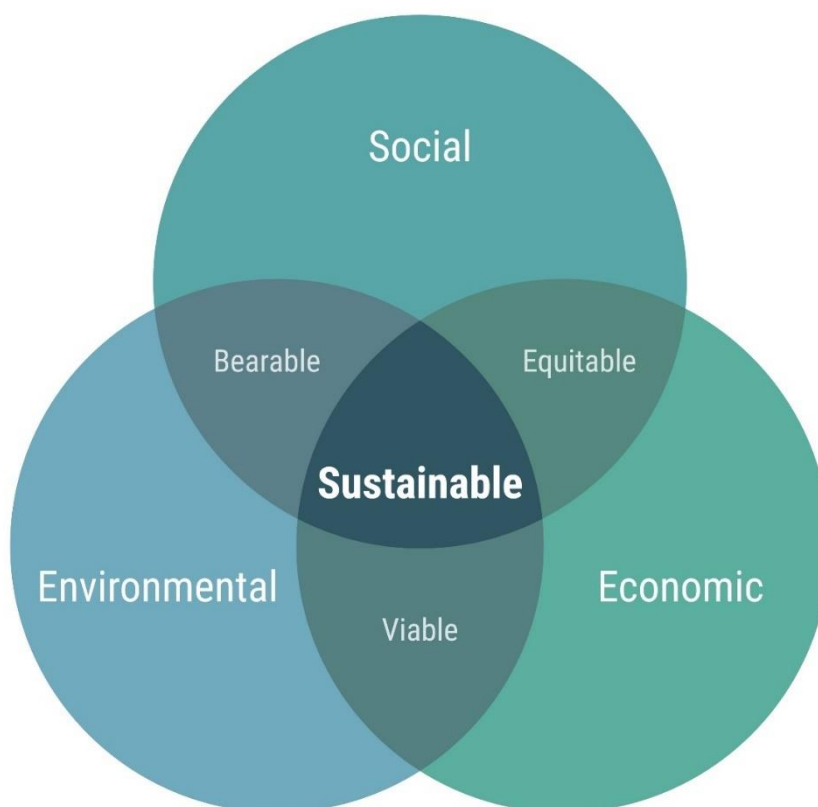
3.7 Βιώσιμη Ανάπτυξη και Αιολική Ενέργεια: Μια Σύνθετη Ισορροπία

Η **Βιώσιμη Ανάπτυξη** (Sustainable Development) αποτελεί τον κεντρικό πυλώνα στον οποίο βασίζεται η ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και

ειδικότερα των αιολικών πάρκων. Σύμφωνα με τη σύγχρονη βιβλιογραφία, η βιώσιμη ανάπτυξη δεν αφορά μόνο την παραγωγή "πράσινης" ενέργειας, αλλά την εξισορρόπηση τριών αλληλένδετων διαστάσεων: της περιβαλλοντικής, της οικονομικής και της κοινωνικής.

3.7.1 Η Έννοια της Βιώσιμης Ανάπτυξης στις ΑΠΕ

Η βιώσιμη ανάπτυξη ορίζεται ως η ανάπτυξη που ικανοποιεί τις ανάγκες του παρόντος χωρίς να διακυβεύει την ικανότητα των μελλοντικών γενεών να ικανοποιήσουν τις δικές τους ανάγκες. Στην περίπτωση των αιολικών πάρκων, αυτό μεταφράζεται στην αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων με καθαρή ενέργεια, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα ότι η εγκατάσταση των μηχανών δεν θα καταστρέψει το τοπικό οικοσύστημα.



Εικόνα 3.1: Η έννοια της βιώσιμης ανάπτυξης

3.7.2 Περιβαλλοντική Βιωσιμότητα: Η Αρχή της Φέρουσας Ικανότητας

Η περιβαλλοντική διάσταση της βιωσιμότητας επικεντρώνεται στη διατήρηση της βιοποικιλότητας και των φυσικών πόρων (Εικ. 3.1).

- **Φέρουσα Ικανότητα:** Σε γενικό πλαίσιο, κάθε οικοσύστημα και γεωγραφική περιοχή χαρακτηρίζεται από ένα συγκεκριμένο όριο «φέρουσας ικανότητας», δηλαδή τη μέγιστη πίεση ή τον μέγιστο αριθμό υποδομών που μπορεί να δεχτεί χωρίς να αλλοιωθεί ανεπανόρθωτα ο χαρακτήρας του, το τοπίο και η οικολογική του ισορροπία. Η υπέρβαση αυτού του ορίου έρχεται σε άμεση σύγκρουση με τις αρχές της βιωσιμότητας (Wolsink, 2020). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση της Κρήτης, όπου σχετική μελέτη (Αρβανίτη & Κουμαντάς, 2025) τονίζει ότι η άναρχη χωροθέτηση και η υπερσυγκέντρωση ανεμογεννητριών απειλεί να υποβαθμίσει το ιδιαίτερο φυσικό και πολιτισμικό περιβάλλον του νησιού. Η ανάγκη για έναν ορθολογικό προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας των προστατευόμενων περιοχών στην Ελλάδα, ειδικά υπό το πρίσμα της υψηλής βιοποικιλότητας, υπογραμμίζεται έντονα και από τη σύγχρονη εγχώρια επιστημονική έρευνα (Kati et al., 2021).
- **Προστασία Natura 2000:** Η βιώσιμη χωροθέτηση απαιτεί τον αυστηρό αποκλεισμό περιβαλλοντικά ευαίσθητων ζωνών, όπως οι προστατευόμενες περιοχές του δικτύου Natura 2000, σύμφωνα με τις κατευθύνσεις του Ειδικού Πλαισίου Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις ΑΠΕ (ΦΕΚ 2464/Β/2008), καθώς και τις μετέπειτα αυστηρές προβλέψεις του Ν. 4685/2020 για τον εκσυγχρονισμό της περιβαλλοντικής νομοθεσίας. Παράλληλα, επιβάλλεται η εφαρμογή προηγμένων μέτρων μετριασμού των επιπτώσεων (π.χ. συστήματα αυτόματης παύσης λειτουργίας των στροβίλων - *shutdown on demand*) με σκοπό την αποτελεσματική προστασία της ορνιθοπανίδας, ακολουθώντας τις διεθνείς βέλτιστες πρακτικές και οδηγίες (IUCN, 2021; Kończak, 2024).

3.7.3 Οικονομική Βιωσιμότητα και Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA)

Η οικονομική βιωσιμότητα εξετάζει την αποδοτικότητα της επένδυσης σε βάθος χρόνου.

- **Ενεργειακή Αποπληρωμή:** Σύμφωνα με σύγχρονες μελέτες Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA) για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των συστημάτων Α.Π.Ε. (Günay et al., 2024; Συλλογικό Έργο, χ.χ.), μια σύγχρονη ανεμογεννήτρια παρουσιάζει εξαιρετικά θετικό λόγο ενεργειακής αποπληρωμής (energy payback ratio). Παράγει πολλαπλάσια ενέργεια κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της (με τυπικό εκτιμώμενο χρόνο ζωής $L=25$ έτη) σε σχέση με την ενέργεια που απαιτήθηκε για ολόκληρο τον

κύκλο ζωής της — δηλαδή την εξόρυξη των πρώτων υλών, την κατασκευή, τη μεταφορά, την εγκατάσταση και την τελική αποξήλωσή της (Llera et al., 2021).

- **Κυκλική Οικονομία:** Η σύγχρονη και πιο πειστική πρόκληση στον τομέα της βιωσιμότητας αφορά την ενσωμάτωση των αρχών της κυκλικής οικονομίας και τη διαχείριση των υλικών στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Αυτό μεταφράζεται στην ανάγκη εύρεσης αποτελεσματικών και οικονομικά βιώσιμων μεθόδων ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης των σύνθετων υλικών από τα οποία κατασκευάζονται τα πτερύγια, ώστε να ελαχιστοποιούνται τα παραγόμενα απόβλητα και να μειώνεται η συνολική επίδραση στη βιοποικιλότητα (Schoning & Odeberg, 2023).

3.7.4 Κοινωνική Βιωσιμότητα και Ενεργειακή Δικαιοσύνη

Μια επένδυση δεν μπορεί να θεωρηθεί βιώσιμη αν δεν είναι κοινωνικά αποδεκτή. Η βιωσιμότητα απαιτεί τη συμμετοχή των τοπικών κοινωνιών στη λήψη αποφάσεων. Η έλλειψη διαβούλευσης οδηγεί σε κοινωνικές συγκρούσεις που ακυρώνουν τον "πράσινο" χαρακτήρα των έργων. Η δίκαιη κατανομή των κερδών (π.χ. μείωση κόστους ρεύματος για τους κατοίκους) ενισχύει την κοινωνική συνοχή και την αποδοχή της ενεργειακής μετάβασης.

3.8 Στρατηγικές Βελτιστοποίησης και Κοινωνικής Ένταξης των Αιολικών Έργων

Η κοινωνική αποδοχή (Social Acceptance) αποτελεί το "κλειδί" για τη βιωσιμότητα των αιολικών επενδύσεων. Η μέχρι τώρα εμπειρία δείχνει ότι οι αντιδράσεις μειώνονται δραστικά όταν η κοινότητα μετατρέπεται από παθητικό θεατή σε ενεργό συμμετοχο. Ως καλές πρακτικές αναφέρονται:

- **Ενεργειακές Κοινότητες:** Η συμμετοχή των πολιτών σε συνεργατικά σχήματα επιτρέπει τη συνιδιοκτησία των έργων. Αυτό διασφαλίζει ότι τα οικονομικά οφέλη παραμένουν στην τοπική κοινωνία, ενισχύοντας την έννοια της **Ενεργειακής Δικαιοσύνης**.
- **Διαφάνεια και Συμμετοχικός Σχεδιασμός:** Η ευαισθητοποίηση ξεκινά από την προσυμβατική φάση. Η ανοιχτή πρόσβαση στις Μελέτες Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ) και η διοργάνωση δημόσιων διαβουλεύσεων μειώνουν το αίσθημα της "επιβολής" ενός έργου (Arvaniti & Koumantas, 2025).
- **Οικονομικά Κίνητρα:** Πέραν του θεσμοθετημένου 3% επί των ακαθάριστων εσόδων, η έρευνα προτείνει τη δημιουργία τοπικών θέσεων εργασίας και τη χρηματοδότηση κοινωνικών υποδομών ως μέσο αντισταθμιστικού οφέλους.

3.8.1 Στρατηγικό Πλαίσιο Βιώσιμης Ανάπτυξης Αιολικών Έργων στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, η κοινωνική αποδοχή αποτελεί το συχνότερο εμπόδιο για την ολοκλήρωση αιολικών έργων. Η μετάβαση από το μοντέλο του "παθητικού αποδέκτη" στο μοντέλο της "ενεργειακής δημοκρατίας" είναι απαραίτητη. Για την αύξηση της κοινωνικής αποδοχής έχει θεσμοθετηθεί τα εξής:

- **Ενεργειακές Κοινότητες (Ν. 4513/2018 & Ν. 5037/2023):** Η Ελλάδα διαθέτει ένα από τα πιο προοδευτικά πλαίσια για τη δημιουργία ενεργειακών κοινοτήτων. Η συμμετοχή τοπικών φορέων, επιχειρήσεων και πολιτών ως συνιδιοκτητών επιτρέπει την άμεση οικονομική ωφέλεια και μειώνει το αίσθημα της εξωτερικής επιβολής.
- **Ανταποδοτικά Οφέλη:** Η ορθή εφαρμογή του τέλους 3% (1,7% στους Δήμους, 1% στους οικιακούς καταναλωτές και 0,3% στο Πράσινο Ταμείο) πρέπει να συνοδεύεται από απόλυτη διαφάνεια. Η κοινότητα πρέπει να βλέπει τα έσοδα αυτά να μεταφράζονται σε ορατά έργα υποδομής ή μείωση του ενεργειακού κόστους.
- **Πρώιμη Διαβούλευση:** Η ενημέρωση ξεκινά πριν από την κατάθεση της Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ), με ανοιχτές συζητήσεις που αναγνωρίζουν τις τοπικές ιδιαιτερότητες (π.χ. κτηνοτροφία, τουρισμός).

3.9 Τρόποι Ελαχιστοποίησης Θορύβου και Οπτικής Όχλησης

Η τεχνολογική εξέλιξη επικεντρώνεται στη μείωση των επιπτώσεων που επηρεάζουν την ποιότητα ζωής των κατοίκων. Ως ενδεικτικές τεχνολογίες προς την κατεύθυνση αυτή αναφέρονται:

- **Ακουστική Βελτιστοποίηση:** Η χρήση πτερυγίων με **τεχνολογία οδοντωτών απολήξεων (serrations)** είναι κρίσιμη για τη μείωση του θορύβου σε οικισμούς που βρίσκονται σε ορεινές περιοχές όπου ο ήχος μπορεί να ανακλάται στις πλαγιές.
- **Χωροθέτηση (Micro-siting):** Ο σχεδιασμός πρέπει να αποφεύγει τις κορυφογραμμές που αποτελούν το "οπτικό ορόσημο" ενός τόπου. Η χρήση ψηφιακών μοντέλων εδάφους (GIS) επιτρέπει την τοποθέτηση των ανεμογεννητριών σε σημεία με τη λιγότερη δυνατή οπτική επαφή από αρχαιολογικούς χώρους ή παραδοσιακούς οικισμούς.
- **Shadow Flicker:** Η εγκατάσταση έξυπνων αισθητήρων που σταματούν τη λειτουργία κατά τις ώρες που η γωνία του ήλιου δημιουργεί διαλείπουσα σκίαση σε κατοικίες είναι πλέον απαραίτητη προδιαγραφή στις σύγχρονες ΑΕΠΟ (Αποφάσεις Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων).

3.10 Διαρκής Παρακολούθηση και Εκτίμηση Επιπτώσεων

Η περιβαλλοντική ευθύνη δεν τελειώνει με την εγκατάσταση του πάρκου, αλλά συνεχίζεται καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του.

- **Post-Construction Monitoring:** Συστηματική καταγραφή της θνησιμότητας πτηνών και νυχτερίδων για τουλάχιστον δύο έτη μετά την έναρξη λειτουργίας, ώστε να επικαιροποιούνται τα μέτρα προστασίας.
- **Ετήσιες Περιβαλλοντικές Εκθέσεις:** Η διαρκής αξιολόγηση της κατάστασης της χλωρίδας και της διάβρωσης του εδάφους στις πλατείες εγκατάστασης, με υποχρέωση αποκατάστασης όπου απαιτείται. Επίσης, πρέπει να διενεργούνται ανεξάρτητοι έλεγχοι από ορνιθολόγους και ειδικούς επιστήμονες για τουλάχιστον 5 έτη μετά την έναρξη λειτουργίας, με τα δεδομένα να δημοσιεύονται στο **Ηλεκτρονικό Περιβαλλοντικό Μητρώο (ΗΠΜ)**.
- **Συνεχής Αποκατάσταση Τοπίου:** Η συνεχής εκτίμηση της διάβρωσης του εδάφους και η φύτευση ενδημικής βλάστησης στις περιοχές των έργων διασφαλίζει ότι η επέμβαση στο περιβάλλον παραμένει αναστρέψιμη.

Για να επιτύχει η Ελλάδα τους στόχους του ΕΣΕΚ (Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα), η ανάπτυξη των αιολικών πάρκων πρέπει να βασιστεί σε έναν **τριπλό άξονα**: τεχνολογική υπεροχή (αποθήκευση/θόρυβος), αυστηρή περιβαλλοντική επίβλεψη και, κυρίως, στη μετατροπή των τοπικών κοινωνιών σε ενεργούς μετόχους της "πράσινης" ανάπτυξης.

Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων Αιολικού Πάρκου

Η εγκατάσταση και λειτουργία αιολικών πάρκων αποτελεί έναν από τους βασικότερους πυλώνες για τη μετάβαση σε καθαρές μορφές ενέργειας και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Ωστόσο, όπως κάθε βιομηχανική δραστηριότητα, έτσι και η αιολική ενέργεια έχει ορισμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι οποίες διακρίνονται σε θετικές και αρνητικές.

Τα οφέλη που προσφέρει το αιολικό πάρκο είναι η δραστική μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της ηλεκτροπαραγωγής. Με την αιολική ενέργεια υπάρχει μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, διότι, κατά την λειτουργία της δεν εκπέμπονται χημικά στοιχεία, όπως διοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του θείου ή οξείδιο του αζώτου. Επίσης, σε αντίθεση με τους θερμοηλεκτρικούς ή πυρηνικούς σταθμούς, οι ανεμογεννήτριες δεν χρειάζονται νερό για την ψύξη τους, προστατεύοντας τους υδάτινους πόρους. Τέλος, έχει βιώσιμο κύκλο ζωής. Παρά το γεγονός της κατασκευής τους απαιτεί αρκετή ενέργεια, μια Α/Γ αποσβένει το ενεργειακό της κόστος μέσα στους πρώτους 6-9 μήνες της λειτουργίας της.

Ωστόσο, υπάρχουν και αρνητικές επιπτώσεις, όπου εντοπίζονται κυρίως σε τοπικό επίπεδο και σχετίζονται με το οικοσύστημα, το τοπίο και τις κοινότητες που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από το έργο. Οι επιπτώσεις αυτές παρουσιάζονται στο Κεφ. 3 αναλυτικά και εμφανίζονται κυρίως στην πανίδα, στη μορφολογία του εδάφους, την όχληση είτε αυτή είναι οπτική ή ακουστική (θόρυβος) και στο οικοσύστημα ανεξαρτήτως αν η Α/Γ βρίσκεται σε χερσαίο ή σε θαλάσσιο χώρο.

4.1 Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων

Για την περιβαλλοντική συνειδητοποίηση και αξιολόγηση του έργου συμβάλλει η Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ). Αφορά ένα επιστημονικό και τεχνικό κείμενο που είναι απαραίτητο για την περιβαλλοντική αδειοδότηση έργων και δραστηριοτήτων σε ένα έργο (φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες κλπ.).

Σκοπός της μελέτης είναι να εξετάζει αναλυτικά τις πιθανές επιπτώσεις που θα έχει ένα έργο ως προς το περιβάλλον και προτείνει μέτρα για την πρόληψη, τον περιορισμό ή την αποκατάστασή τους. Η ΜΠΕ αποτελεί τη βάση για την έκδοση της Απόφασης Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΑΕΠΟ). Οι όροι και οι περιορισμοί που αναφέρονται στη θεωρημένη ΜΠΕ είναι υποχρεωτικοί για τον φορέα του έργου. Το περιεχόμενο της μελέτης περιλαμβάνει στοιχεία, όπως τίτλους ιδιοκτησίας, όρους

δόμησης και τεχνικές περιγραφές, τα οποία εξετάζονται από τις υπηρεσίες ώστε να διαπιστωθεί αν το έργο είναι συμβατό με την περιοχή.

Η ΜΠΕ θα πρέπει να είναι πάντα διαθέσιμη και να βρίσκεται στον χώρο του έργου μαζί με την ΑΕΠΟ, ώστε να επιδεικνύεται σε οποιονδήποτε έλεγχο από τις αρμόδιες αρχές. Επίσης, σε περίπτωση που ανακύψουν ζητήματα κατά την εφαρμογή του έργου που δεν καλύπτονται από την ΑΕΠΟ, η επίλυσή τους γίνεται με βάση τα όσα ορίζονται στη θεωρημένη μελέτη.

Με απλά λόγια, η ΜΠΕ είναι το «σχέδιο περιβαλλοντικής προστασίας» του έργου, το οποίο ο μηχανικός και ο φορέας οφείλουν να ακολουθούν πιστά.

4.1.1 Δομή Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων

Η δομή μιας ΜΠΕ στην Ελλάδα είναι αυστηρά καθορισμένη από τη νομοθεσία, πιο συγκεκριμένα βάσει του Ν. 4014/2011 και της Υπουργικής Απόφασης οικ. 170225/2014, όπως έχουν τροποποιηθεί και ισχύουν.

Στόχος της δομής είναι να παρουσιάσει το έργο με απόλυτη διαφάνεια, να αναλυθεί το περιβάλλον στο οποίο θα ενταχθεί και να προταθούν συγκεκριμένες λύσεις προστασίας.

Η τυπική διάρθρωση μιας ΜΠΕ χωρίζεται στα εξής κεφάλαια:

- Σε μία περιληπτική/μη τεχνική περιγραφή, όπου παρουσιάζεται για το ευρύ κοινό. Πρόκειται για μια σύντομη, κατανοητή και χωρίς περίπλοκους όρους περίληψη ολόκληρης της μελέτης. Χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία της δημόσιας διαβούλευσης, ώστε οι πολίτες και οι τοπικοί φορείς να κατανοήσουν εύκολα με τι σχετίζεται το έργο και ποιες θα είναι οι επιπτώσεις του.
- Το επόμενο κομμάτι αναφέρεται στα γενικά στοιχεία του έργου. Με τα στοιχεία του φορέα δηλαδή τα στοιχεία της εκάστοτε εταιρίας ή του ιδιώτη, τους μηχανικούς, με τα ονόματα και τις ειδικότητές του που συνέταξαν την μελέτη και τέλος την κατάταξη του έργου, δηλαδή σε ποια θεσμοθετημένη περιβαλλοντική κατηγορία ανήκει το έργο (Α1, Α2 ή Β).

Όσον αφορά την κατάταξη σχετίζεται με το Ν. 4014/2011 Άρθρο 1. Εντός του νομοθετικού πλαισίου αναφέρεται πίνακας (Πιν. 4.1) σχετικά με τις κατηγορίες και το επίπεδο επιπτώσεων ως προς το περιβάλλον.

Πίνακας 4.1: Κατάταξη του έργου βάσει περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Κατηγορία / Υποκατηγορία	Επίπεδο Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων	Απαιτούμενη Διαδικασία / Μελέτη	Αρμόδια Αρχή για την Έγκριση
Υποκατηγορία Α1	Πολύ σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.	Σύνταξη πλήρους ΜΠΕ και έκδοση Απόφασης Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΑΕΠΟ).	Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ)
Υποκατηγορία Α2	Σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.	Σύνταξη πλήρους ΜΠΕ και έκδοση Απόφασης Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΑΕΠΟ).	Αποκεντρωμένη Διοίκηση (της εκάστοτε περιφέρειας)
Κατηγορία Β	Τοπικές και μη σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.	Δεν απαιτείται ΜΠΕ. Το έργο υπάγεται απευθείας σε ΠΠΔ (Πρότυπες Περιβαλλοντικές Δεσμεύσεις).	Περιφέρεια (ή η αρμόδια Διεύθυνση Ανάπτυξης/Μεταφορών που βγάζει την άδεια λειτουργίας)
Εκτός Κατηγορίας	Αμελητέες έως μηδενικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.	Καμία περιβαλλοντική αδειοδότηση.	Δεν εμπλέκεται περιβαλλοντική υπηρεσία.

- Εντός της μελέτης υπάρχει αναλυτική περιγραφή του έργου, όπου ο μηχανικός περιγράφει τα τεχνικά στοιχεία του έργου σε όλες τις φάσεις του (Κατασκευή, Λειτουργία, καθώς και την ενδεχόμενη αποξήλωση/ αποκατάσταση). Μαζί με αυτό αναφέρονται η γεωγραφική θέση του έργου και οι ακριβείς συντεταγμένες σε μορφή ΕΓΣΑ '87, το μέγεθος, ο σχεδιασμός και τα τεχνικά χαρακτηριστικά στο αιολικό πάρκο (ανεμογεννήτριες, ύψος, οδοποιία, δίκτυο μεταφοράς ρεύματος κ.α.), τις απαιτούμενες πρώτες ύλες και το είδος και η ποσότητα των αναμενόμενων καταλοίπων και εκπομπών.
- Επίσης, θα πρέπει να αναφέρονται και να εξετάζονται οι εναλλακτικές επιλογές για το έργο. Είναι στις υποχρεώσεις του μελετητή να ελέγξει, ως προς τη θέση, το μέγεθος ή την τεχνολογία που χρησιμοποιείται, και να δικαιολογήσει γιατί επιλέχθηκε η συγκεκριμένη περίπτωση. Ωστόσο, σε αυτό το σημείο περιλαμβάνεται και η κατηγορία «Μηδενική Λύση», δηλαδή την εξέταση των συνεπειών που θα υπάρξουν στο περιβάλλον αν το έργο δεν πραγματοποιηθεί καθόλου.
- Να γίνεται αποτύπωση της περιοχής πριν την κατασκευή του έργου. Οι παράγοντες που εξετάζονται αναφέρονται και στο Κεφάλαιο 3, που μιλάει γενικά για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του έργου.
- Έπειτα από αυτό να ακολουθεί και ένας πίνακας εκτίμησης και αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Από αυτό εξετάζονται πως οι δραστηριότητες του

έργου θα επηρεάσουν κάθε παράγοντα του περιβάλλοντος. Οι επιπτώσεις κατηγοριοποιούνται σε:

- Θετικές ή αρνητικές.
 - Άμεσες ή έμμεσες.
 - Προσωρινές, οι οποίες εμφανίζονται κατά τη φάση της κατασκευής ή μόνιμες, οι οποίες εμφανίζονται κατά τη λειτουργία.
 - Και σωρευτικές, δηλαδή το πως αλληλοεπιδρούν με άλλα γειτονικά έργα.
- Εκτελώντας το πρόγραμμα αξιολόγησης και εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων γίνεται και ο αντίστοιχος μετριασμός τους. Ο εκάστοτε μηχανικός πρέπει να προτείνει συγκεκριμένα, υλοποιήσιμα και κοστολογημένα τεχνικά μέτρα για την πρόληψη, τη μείωση ή την αποκατάσταση της ζημιάς. Όλα αυτά αναφέρονται και στο Κεφάλαιο 3.
 - Τέλος, η μελέτη συνοδεύεται και από υποστηρικτικό υλικό όπως:
 - Τοπογραφικούς χάρτες και διαγράμματα.
 - Επίσημες γνωμοδοτήσεις ή εγκρίσεις (π.χ. πράξη χαρακτηρισμού από το Δασαρχείο, άδεια από την Αρχαιολογική Υπηρεσία).
 - Ειδικές επιμέρους μελέτες, εάν απαιτούνται.

Στις Εικόνες 4.1 έως 4.5 φαίνεται η φόρμα υποβολής ΜΠΕ για αιολικό πάρκο Κατηγορίας Α'. Η συγκεκριμένη φόρμα αποτελείται από 5 σελίδες και η διαδικασία της γίνεται διαδικτυακά.

Υ	ΕΝΤΥΠΟ ΥΠΟΒΟΛΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ Για την περιβαλλοντική αδειοδότηση έργων και δραστηριοτήτων ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ Α
---	--

1. Αντικείμενο Φακέλου Υποβολής	
1.A. Υποβολή Φακέλου για διαδικασία προκαταρκτικού προσδιορισμού περιβαλλοντικών απαιτήσεων-ΠΠΠΑ-(παρ. 2α του άρ. 3 ΤΟΥ Ν. 4014/2011, όπως ισχύει) νέου Έργου ή Δραστηριότητας (Παρακαλώ, σημειώστε με Χ το κατάλληλο τετράγωνο)	
1.A.1. ☐ Υποβολή Φακέλου ΠΠΠΑ	☐
Παρακαλώ, σημειώστε τον κατάλληλο αριθμό(π.χ. 1 για πρώτη υποβολή, 2 για δεύτερη κ.ο.κ.)	
1.A.2. Υποβολή αντιγράφων Φακέλου ΠΠΠΑ (μετά τον έλεγχο πληρότητας)	☐
1.A.3. Υποβολή πρόσθετων αντιγράφων φακέλου ΠΠΠΑ	☐
1.A.4. Υποβολή απόψεων-συμπληρωματικών στοιχείων επί των γνωμοδοτήσεων των υπηρεσιών και των φορέων της διοίκησης	☐
1.A.5. Άλλο	☐
Περιγραφή:	
1.B. Υποβολή ΜΠΕ για διαδικασία έκδοσης απόφασης έγκρισης περιβαλλοντικών όρων-ΑΕΠΟ- (παρ. 2B του άρ.. 3 ΤΟΥ Ν. 4014/2011, όπως ισχύει) νέου Έργου ή Δραστηριότητας (Παρακαλώ, σημειώστε με Χ το κατάλληλο τετράγωνο)	
1.B.1. ☐ Υποβολή Φακέλου ΜΠΕ	☐
Παρακαλώ, σημειώστε τον κατάλληλο αριθμό(π.χ.1 για πρώτη υποβολή, 2 για δεύτερη κ.ό.κ.)	
1.B.2. Υποβολή αντιγράφων ΜΠΕ (μετά τον έλεγχο πληρότητας)	☐
1.B.3. Υποβολή πρόσθετων αντιγράφων ΜΠΕ	☐
1.B.4. Υποβολή απόψεων-συμπληρωματικών στοιχείων επί των γνωμοδοτήσεων των υπηρεσιών και των φορέων της διοίκησης καθώς και των απόψεων του κοινού και άλλων φορέων (διαδικασία διαβούλευσης)	☐
1.B.5. Άλλο	☐
Περιγραφή:	

Εικόνα 4.1: Φόρμα συμπλήρωσης ΜΠΕ (σελίδα 1/5)

Υ	ΕΝΤΥΠΟ ΥΠΟΒΟΛΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ Για την περιβαλλοντική αδειοδότηση έργων και δραστηριοτήτων ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ Α
---	---

1.Γ. Υποβολή φακέλου για διαδικασία ανανέωσης Απόφασης Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων-ΑΕΠΟ (άρ. 5 του Ν. 4014/2011, όπως ισχύει) Αριθμός Πρωτοκόλλου/ Ημερομηνία Α.Ε.Π.Ο. : _____ Αριθμός Διαδικτυακής Ανάρτησης (Α.Δ.Α.) : _____ Περιβαλλοντική Ταυτότητα (ΠΕΤ) Έργου ή Δραστηριότητας : _____ (Παρακαλώ, σημειώστε με Χ το κατάλληλο τετράγωνο)	
1.Γ.1.	☐ Υποβολή φακέλου ανανέωσης ΑΕΠΟ ☐ Παρακαλώ, σημειώστε τον κατάλληλο αριθμό(π.χ. 1 για πρώτη υποβολή, 2 για δεύτερη κ.ο.κ.)
1.Γ.2.	Υποβολή αντιγράφων φακέλου ανανέωσης ΑΕΠΟ (μετά τον έλεγχο πληρότητας) ☐
1.Γ.3.	Υποβολή πρόσθετων αντιγράφων φακέλου ανανέωσης ΑΕΠΟ ☐
1.Γ.4. Άλλα	Περιγραφή: ☐
1.Δ. Υποβολή ΜΠΕ για διαδικασία ανανέωσης Απόφασης Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων-ΑΕΠΟ (παρ. 2β του άρ. 3 & άρ. 5 του Ν. 4014/2011, όπως ισχύει) Αριθμός Πρωτοκόλλου / Ημερομηνία Α.Ε.Π.Ο. : _____ Αριθμός Διαδικτυακής Ανάρτησης (Α.Δ.Α.) : _____ Περιβαλλοντική Ταυτότητα (ΠΕΤ) Έργου ή Δραστηριότητας : _____ (Παρακαλώ, σημειώστε με Χ το κατάλληλο τετράγωνο)	
1.Δ.1.	☐ Υποβολή ΜΠΕ ☐ Παρακαλώ, σημειώστε τον κατάλληλο αριθμό(π.χ. 1 για πρώτη υποβολή, 2 για δεύτερη κ.ο.κ.)
1.Δ.2.	Υποβολή αντιγράφων ΜΠΕ (μετά τον έλεγχο πληρότητας) ☐
1.Δ.3.	Υποβολή πρόσθετων αντιγράφων ΜΠΕ ☐
1.Δ.4.	Υποβολή απόψεων-συμπληρωματικών στοιχείων επί των γνωμοδοτήσεων των υπηρεσιών και των φορέων της διοίκησης καθώς και των απόψεων του κοινού και άλλων φορέων (διαδικασία διαβούλευσης) ☐
1.Δ.5. Άλλα	Περιγραφή: ☐

: Συμπληρώνεται από τον φορέα του έργου ή της δραστηριότητας εφόσον έχει λάβει αριθμό διαδικτυακής ανάρτησης (Α.Δ.Α.)
 : Συμπληρώνεται από τον φορέα του έργου ή της δραστηριότητας εφόσον έχει λάβει ΠΕΤ σε προηγούμενο στάδιο περιβαλλοντικής αδειοδότησης.

Εικόνα 4.2: Φόρμα συμπλήρωσης ΜΠΕ (σελίδα 2/5)

Υ	ΕΝΤΥΠΟ ΥΠΟΒΟΛΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ Για την περιβαλλοντική αδειοδότηση έργων και δραστηριοτήτων ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ Α
---	---

1.Ε. Υποβολή φακέλου για διαδικασία τροποποίησης Απόφασης Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων-ΑΕΠΟ- (άρ. 6 του Ν. 4014/2011, όπως ισχύει)	
Αριθμός Πρωτοκόλλου/ Ημερομηνία Α.Ε.Π.Ο. :	
Αριθμός Διαδικτυακής Ανάρτησης (Α.Δ.Α.) :	
Περιβαλλοντική Ταυτότητα (ΠΕΤ) Έργου ή Δραστηριότητας :	
(Παρακαλώ, σημειώστε με Χ το κατάλληλο τετράγωνο)	
1.Ε.1 ☐ Υποβολή φακέλου τροποποίησης ΑΕΠΟ Παρακαλώ, σημειώστε τον κατάλληλο αριθμό, 1 για πρώτη υποβολή, 2 για δεύτερη κ.ά.κ.)	☐
1.Ε.2.Υποβολή αντιγράφων φακέλου τροποποίησης ΑΕΠΟ (μετά τον έλεγχο πληρότητας)	☐
1.Ε.3. Υποβολή πρόσθετων αντιγράφων φακέλου τροποποίησης ΑΕΠΟ	☐
1.Ε.4. Άλλο Περιγραφή:	☐

1.ΣΤ. Υποβολή ΜΠΕ για διαδικασία τροποποίησης Απόφασης Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων-ΑΕΠΟ- (παρ.. 2Β του άρ. 3 & άρ. 6 του Ν. 4014/2011, όπως ισχύει)	
Αριθμός Πρωτοκόλλου/ Ημερομηνία Α.Ε.Π.Ο. :	
Αριθμός Διαδικτυακής Ανάρτησης (Α.Δ.Α.) :	
Περιβαλλοντική ΤαυτότηταΑ (ΠΕΤ) Έργου ή Δραστηριότητας :	
(Παρακαλώ, σημειώστε με Χ το κατάλληλο τετράγωνο)	
1.ΣΤ.1. ☐ Υποβολή ΜΠΕ Παρακαλώ, σημειώστε τον κατάλληλο αριθμό (π.χ. 1 για πρώτη υποβολή, 2 για δεύτερη κ.α.κ.)	☐
1.ΣΤ.2. Υποβολή αντιγράφων ΜΠΕ (μετά τον έλεγχο πληρότητας)	☐
1.ΣΤ.3. Υποβολή πρόσθετων αντιγράφων ΜΠΕ	☐
1.ΣΤ.4. Υποβολή απόψεων-συμπληρωματικών στοιχείων επί των γνημοδοτήσεων των υπηρεσιών και των φορέων της διοίκησης καθώς και των απόψεων του κοινού και άλλων φορέων (διαδικασία διαβούλευσης)	☐
1.ΣΤ.5. Άλλο Περιγραφή:	☐

1 Συμπληρώνεται από τον φορέα του έργου ή της δραστηριότητας εφόσον έχει λάβει αριθμό διαδικτυακής ανάρτησης (Α.Δ.Α.)
 2 Συμπληρώνεται από τον φορέα του έργου ή της δραστηριότητας εφόσον έχει λάβει ΠΕΤ σε προηγούμενο στάδιο περιβαλλοντικής αδειοδότησης.

Εικόνα 4.3: Φόρμα συμπλήρωσης ΜΠΕ (σελίδα 3/5)

Υ	ΕΝΤΥΠΟ ΥΠΟΒΟΛΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ Για την περιβαλλοντική αδειοδότηση έργων και δραστηριοτήτων ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ Α
----------	---

1.Ζ. Υποβολή φακέλου Συμμόρφωσης Τελικού Σχεδιασμού Αριθμός Πρωτοκόλλου / Ημερομηνία Α.Ε.Π.Ο. : _____	
Αριθμός Διαδικτυακής Ανάρτησης (Α.Δ.Α.) : _____	
Περιβαλλοντική Ταυτότητα (ΠΕΤ) Έργου ή Δραστηριότητας : _____ (Παρακαλώ, σημειώστε με Χ το κατάλληλο τετράγωνο)	
1.Ζ.1. Υποβολή φακέλου Συμμόρφωσης Τελικού Σχεδιασμού	☐
1.Ζ.2. Άλλο Περιγραφή: _____	☐
1.Η. Υποβολή τεχνικής Περιβαλλοντικής Μελέτης (Παρ. 2 ΤΟΥ Δα. 7 ΤΟΥ Ν. 4014/2011, όπως ισχύει) Αριθμός Πρωτοκόλλου / Ημερομηνία Α.Ε.Π.Ο. : _____	
Αριθμός Διαδικτυακής Ανάρτησης (Α.Δ.Α.) : _____	
Περιβαλλοντική Ταυτότητα (ΠΕΤ) Έργου ή Δραστηριότητας : _____ (Παρακαλώ, σημειώστε με Χ το κατάλληλο τετράγωνο)	
1.Η.1. ☐ Υποβολή Τεχνικής Περιβαλλοντικής Μελέτης (ΤΕΠΕΜ)	☐
Παρακαλώ, σημειώστε τον κατάλληλο αριθμό (π.χ. 1 για πρώτη υποβολή, 2 για δεύτερη κ.ό.κ.)	
1.Η.2. Άλλο Περιγραφή: _____	☐

2. Αριθμός αντιγράφων που υποβάλλονται	
2.1. Σε έντυπη μορφή	_____
2.2. Σε ψηφιακή μορφή	_____

1 Συμπληρώνεται από τον φορέα του έργου ή της δραστηριότητας εφόσον έχει λάβει αριθμό διαδικτυακής ανάρτησης (Α.Δ.Α.)
 2 Συμπληρώνεται από τον φορέα του έργου ή της δραστηριότητας εφόσον έχει λάβει ΠΕΤ σε προηγούμενο στάδιο περιβαλλοντικής αδειοδότησης.

Εικόνα 4.4: Φόρμα συμπλήρωσης ΜΠΕ (σελίδα 4/5)

Υ	ΕΝΤΥΠΟ ΥΠΟΒΟΛΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ Για την περιβαλλοντική αξιολόγηση έργων και δραστηριοτήτων ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ Α
---	--

3. Συνημμένα έγγραφα (βεβαιώσεις, γνωμοδοτήσεις κλπ.) εφόσον δεν περιλαμβάνονται σε ειδικό παράρτημα του φακέλου	
3.1	☐
3.2	☐
3.3	☐
3.4	☐

Υπογραφή

Εικόνα 4.5: Φόρμα συμπλήρωσης ΜΠΕ (σελίδα 5 /5)

4.2 Ηλεκτρονικό Περιβαλλοντικό Μητρώο (ΗΠΜ)

Το Ηλεκτρονικό Περιβαλλοντικό Μητρώο πρόκειται, όπως λέει και ο τίτλος, για την επίσημη ψηφιακή πλατφόρμα του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ), μέσω της οποίας πραγματοποιείται πλέον αποκλειστικά όλη η διαδικασία της περιβαλλοντικής αδειοδότησης στην Ελλάδα.

Τέθηκε σε λειτουργία το 2018 και βασίζεται στις διατάξεις των νόμων **4014/2011** και **4685/2020**. Στόχος του είναι να καταργήσει τα έντυπα έγγραφα, να πατάξει τη γραφειοκρατία και να επιταχύνει την έκδοση αδειών.

Μέσω της πλατφόρμας επιτυγχάνονται όλα τα στάδια του κύκλου ζωής ενός έργου. Μέσα σε αυτό συμπεριλαμβάνονται:

- Η υποβολή μελετών, όπου οι μηχανικοί ανεβάζουν υπογεγραμμένες και σε ψηφιακή μορφή τις ΜΠΕ
- Τις γνωμοδοτήσεις των υπηρεσιών, σε αυτό το στάδιο όλοι οι εμπλεκόμενοι φορείς (Δασαρχεία, Αρχαιολογία, Δήμοι κ.λπ.) μπαίνουν στο σύστημα της ΥΠΕΝ και μπορούν να καταθέσουν ηλεκτρονικά την έγκριση ή την αντίρρηση – απόρριψη του έργου.
- Από την ΗΜΠ εκδίδονται, τροποποιούνται ή ανανεώνονται οι ΑΕΠΟ ή γίνεται η υπαγωγή σε Πρότυπες Περιβαλλοντικές Δεσμεύσεις (ΠΠΔ).
- Τέλος, εντός της πλατφόρμας έχουν ελεύθερη πρόσβαση όλοι οι πολίτες και οι φορείς με σκοπό να ενημερωθούν για τα σχεδιαζόμενα έργα.

4.2.1 Περιβαλλοντική Ταυτότητα

Κάθε έργο που καταχωρείται στο ΗΠΜ αποκτά έναν μοναδικό αριθμό που ονομάζεται **ΠΕΤ (Περιβαλλοντική Ταυτότητα)**. Η ταυτότητα αυτή ακολουθεί το έργο σε όλο το κύκλο ζωής του. Αν, για παράδειγμα, το αιολικό πάρκο στο Αντίρριο αλλάξει ιδιοκτήτη, κάνει μια τροποποίηση ή μετά από 20 χρόνια προχωρήσει σε αποξήλωση, όλες οι ενέργειες θα καταγραφούν ψηφιακά κάτω από την ίδια ΠΕΤ.

Μέσω της ΠΕΤ εντοπίζει αυτόματα αν νέα αιτήματα γειτνιάζουν ή συνδέονται με υπάρχοντα έργα της αντίστοιχης εταιρείας, αποτρέποντας την παράνομη κατάτμηση μεγάλων έργων, που γίνεται με σκοπό για την αποφυγή αυστηρών ελέγχων.

Επίσης, δίνει τη δυνατότητα στους Επιθεωρητές Περιβάλλοντος και στους εκάστοτε φορείς άμεση πρόσβαση στους ισχύοντες όρους, χάρτες και μελέτες κατά τη διάρκεια μιας αυτοψίας στο πεδίο, πληκτρολογώντας μόνο το κωδικό.

Ακόμη, σε περίπτωση πώλησης, συγχώνευσης ή τραπεζικής χρηματοδότησης, ο νέος επενδυτής αποκτά μια καθαρή ψηφιακή οντότητα με όλο το ιστορικό συμμόρφωσης μέσω της ΠΕΤ.

Χάρis αυτού εξαλείφεται η γραφειοκρατία και στην απώλεια εγγράφων και πλέον όλη αυτή η πληροφορία είναι αποθηκευμένη σε ηλεκτρονική μορφή.

4.3 Άδεια Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΑΕΠΟ)

Η ΑΕΠΟ είναι το ακρωνύμιο για την Άδεια Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων. Πρόκειται για την πιο σημαντική διοικητική πράξη (άδεια) στην όλη διαδικασία υλοποίησης ενός έργου, η οποία εκδίδεται από την αρμόδια περιβαλλοντική αρχή (το Υπουργείο Περιβάλλοντος ή την Αποκεντρωμένη Διοίκηση) αφού πρώτα εξεταστεί και εγκριθεί η Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ).

Η ύπαρξη της ΑΕΠΟ είναι υποχρεωτική από τον νόμο (Ν. 4014/2011) για όλα τα έργα που ανήκουν στην Κατηγορία Α (Υποκατηγορίες Α1 και Α2), δηλαδή για έργα με σημαντικές ή πολύ σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Οι λόγοι για τους οποίους είναι απαραίτητη είναι οι εξής:

- Καταρχάς χάρις την ΑΕΠΟ αποτελεί το ξεκίνημα για να αρχίσει το έργο. Χωρίς την έκδοσή της, απαγορεύεται ρητά η έναρξη οποιασδήποτε εργασίας κατασκευής. Επιπλέον, η ΑΕΠΟ αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για να εκδοθούν όλες οι υπόλοιπες άδειες του έργου, όπως η άδεια εγκατάστασης, λειτουργίας και οι οικοδομικές από την Πολεοδομία.
- Με την ΑΕΠΟ επιτυγχάνεται η μετατροπή της γενικής νομοθεσίας ως ειδική υποχρέωση για την εταιρία ή τον ιδιώτη. Η γενική περιβαλλοντική νομοθεσία μπορεί να λέει π.χ. «η ορνιθοπανίδα πρέπει να προστατεύεται» η ΑΕΠΟ εξειδικεύει αυτόν τον κανόνα για το συγκεκριμένο έργο, ορίζοντας ακριβώς τι πρέπει να κάνει ο μηχανικός του έργου. Με αυτό τον τρόπο, ο επενδυτής ξέρει ακριβώς τι πρέπει να προσέξει.
- Είναι το νομικό εργαλείο για τους ελέγχους. Με την ΑΕΠΟ ό,τι έχει γραφτεί γίνεται αυτόματα και νόμος του συγκεκριμένου έργου. Όταν οι Επιθεωρητές Περιβάλλοντος ή άλλες ελεγκτικές αρχές επισκέπτονται το έργο, δεν ελέγχουν γενικά και αόριστα το περιβάλλον, αλλά κρατούν στα χέρια τους το κείμενο της ΑΕΠΟ και ελέγχουν σημείο προς σημείο αν ο φορέας εφαρμόζει τους όρους. Στην περίπτωση που παρατηρηθεί παράβαση των όρων της ΑΕΠΟ, επιβάλλονται βαριά πρόστιμα ή ακόμα και διακοπή λειτουργίας του έργου.

- Ακόμη, διασφαλίζει τη δημόσια διαβούλευση και τη διαφάνεια της μελέτης. Πριν εκδοθεί μια ΑΕΠΟ, η ΜΠΕ τίθεται σε δημόσια διαβούλευση. Αυτό συνεπάγεται ότι οι τοπικές κοινωνίες, οι πολίτες, οι δήμοι και οι περιβαλλοντικές οργανώσεις έχουν δικαίωμα να εκφράσουν τις αντιρρήσεις ή τις προτάσεις τους. Η τελική ΑΕΠΟ λαμβάνει υπόψη αυτές τις γνωμοδοτήσεις, εξισορροπώντας την οικονομική ανάπτυξη με τις ανάγκες της τοπικής κοινωνίας.
- Τέλος, η ΑΕΠΟ δεν καλύπτει μόνο τη φάση που το έργο χτίζεται ή λειτουργεί. Επιβάλλει υποχρεωτικούς όρους για το τι θα συμβεί όταν το έργο σταματήσει να λειτουργεί, δηλαδή στο πέρας των 20 – 25 χρόνων για το αιολικό πάρκο, υποχρεώνοντας την εταιρεία να αποξηλώσει τις εγκαταστάσεις και να αποκαταστήσει πλήρως το φυσικό τοπίο.

Συνοψίζοντας, η ΑΕΠΟ είναι το επίσημο συμβόλαιο του κράτους με τον επενδυτή, το οποίο εγγυάται ότι το έργο θα κατασκευαστεί και θα λειτουργήσει με το λιγότερο δυνατό αντίκτυπο στη φύση και στους ανθρώπους.

4.4 Πρότυπες Περιβαλλοντικές Δεσμεύσεις (ΠΠΔ)

Οι Πρότυπες Περιβαλλοντικές Δεσμεύσεις (ΠΠΔ) αποτελούν ένα θεσμοθετημένο σύστημα περιβαλλοντικής αδειοδότησης που εισήχθη στην Ελλάδα με το νομοθετικό πλαίσιο Ν. 4014/2011.

Αντίθετα με τα μεγάλα έργα που απαιτούν τη σύνταξη μιας ολόκληρης Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ) και την έκδοση ΑΕΠΟ, οι ΠΠΔ εφαρμόζονται σε έργα με χαμηλές και κυρίως τοπικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Αφορούν αποκλειστικά τα έργα και τις δραστηριότητες που κατατάσσονται στην Κατηγορία Β. Πρόκειται για μικρότερης κλίμακας εγκαταστάσεις όπου περιλαμβάνονται:

- Αιολικά ή φωτοβολταϊκά πάρκα με ονομαστική ισχύ έως 5MW.
- Επαγγελματικά εργαστήρια και μικρές βιοτεχνίες.
- Μικρά ξενοδοχειακά καταλύματα.
- Κτηνοτροφικές μονάδες μικρού μεγέθους και.
- Συνεργεία αυτοκινήτων και πρατήρια καυσίμων.

Η βασική λειτουργία των ΠΠΔ είναι πως το κράτος έχει ήδη αποφασίσει και θεσμοθετήσει τους κατάλληλους περιβαλλοντικούς όρους για κάθε είδους μικρή δραστηριότητα μέσω σχετικών Υπουργικών Αποφάσεων.

Η διαδικασία είναι πολύ πιο απλή και γρήγορη για τον μηχανικό και τον επενδυτή. Ο λόγος είναι ότι δεν χρειάζεται να γίνει Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων το μόνο που χρειάζεται είναι μια υπεύθυνη δήλωση, σε ψηφιακή μορφή, μέσω του ΗΠΜ ή της αρμόδιας υπηρεσίας που βγάζει την άδεια λειτουργίας. Ο μηχανικός το μόνο που συμπληρώνει είναι ένα τυποποιημένο έντυπο με τα τεχνικά στοιχεία του έργου.

Με αυτό τον τρόπο το έργο υπάγεται αυτόματα στις αντίστοιχες ΠΠΔ. Οι όροι αυτοί ενσωματώνονται απευθείας στην άδεια εγκατάστασης ή λειτουργίας του έργου, χωρίς να μεσολαβήσει αναμονή μηνών για εγκρίσεις από περιβαλλοντικές υπηρεσίες.

Οι όροι των ΠΠΔ είναι τυποποιημένοι, σαφείς και περιλαμβάνουν βασικές υποχρεώσεις που πρέπει να τηρεί η επιχείρηση κατά τη λειτουργία της. Αυτοί οι όροι σχετίζονται με τη **διαχείριση αποβλήτων** υποχρεώνοντας τον εκάστοτε επενδυτή την παράδοση ανακυκλώσιμων υλικών όπως μπαταρίες, λάδια και ό,τι άλλου είδους απόβλητα σε εγκεκριμένα συστήματα εναλλακτικής διαχείρισης. Να τηρείται το νόμιμο **όριο του θορύβου** για την προστασία των περιοχών. Ο περιβάλλοντας χώρος να διατηρείται **καθαρός** και να αποφεύγονται οι διαρροές στο έδαφος ή στα δημόσια δίκτυα αποχέτευσης. Τέλος, εντός των ορών της ΠΠΔ είναι και τα **αέρια απόβλητα**, όπου είναι απαραίτητο η εγκατάσταση φίλτρων ή κατάλληλων συστημάτων απαγωγής καυσαερίων στην περίπτωση που πρόκειται για εργοστάσιο ή βιοτεχνία.

Αξίζει να σημειωθεί πως το γεγονός ότι ένα έργο υπάγεται σε ΠΠΔ και όχι σε ΑΕΠΟ δεν σημαίνει ότι δεν ελέγχεται. Οι ελεγκτικές αρχές πραγματοποιούν δειγματοληπτικούς ελέγχους και σε περίπτωση που ο ιδιοκτήτης δεν τηρεί τις Πρότυπες Δεσμεύσεις της, επιβάλλονται τα ίδια αυστηρά πρόστιμα που προβλέπονται για την παραβίαση μιας κλασικής ΑΕΠΟ.

4.5 Ο Εκσυγχρονισμός και οι Πρόσφατες Μεταρρυθμίσεις στο Καθεστώς της Περιβαλλοντικής Αδειοδότησης (ΑΕΠΟ) στην Ελλάδα

Η διαδικασία έκδοσης της Απόφασης Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΑΕΠΟ) στην Ελλάδα αποτελούσε παραδοσιακά ένα από τα πιο χρονοβόρα και γραφειοκρατικά στάδια για την υλοποίηση δημοσίων και ιδιωτικών έργων, με τις καθυστερήσεις στα αιολικά πάρκα να αγγίζουν συχνά τα 7 με 8 έτη. Με σκοπό την επίτευξη των εθνικών και ευρωπαϊκών κλιματικών στόχων, το νομικό πλαίσιο υπέστη μια σειρά ριζικών μεταρρυθμίσεων. Οι αλλαγές αυτές μεταμόρφωσαν το καθεστώς της περιβαλλοντικής αδειοδότησης σε ένα σύστημα ψηφιακό, ταχύτερο και πιο στοχευμένο, που προσπαθεί

να εξισορροπήσει την προστασία των τοπικών οικοσυστημάτων με την ανάγκη για άμεσες επενδύσεις στην πράσινη μετάβαση.

Μία από τις πιο ουσιαστικές αλλαγές αφορά τη διάρκεια ζωής των περιβαλλοντικών αδειών. Με τον **N. 4685/2020**, η βασική διάρκεια ισχύος μιας ΑΕΠΟ αυξήθηκε από τα 10 στα 15 έτη, προσφέροντας στους επενδυτές μακροπρόθεσμη σταθερότητα. Παράλληλα, δόθηκαν κίνητρα για την υιοθέτηση ορθών περιβαλλοντικών πρακτικών: η διάρκεια επεκτείνεται στα 17 έτη εάν ο φορέας διαθέτει πιστοποιημένο Σύστημα Περιβαλλοντικής Διαχείρισης (ISO 14001) και στα 19 έτη αν διαθέτει ευρωπαϊκή πρότυπο Eco – Management and Audit Scheme (EMAS).

Για την περαιτέρω εξάλειψη των γραφειοκρατικών αγκυλώσεων, ο **N. 4951/2022** έφερε καθοριστικές ρυθμίσεις για τις περιπτώσεις όπου ένας σταθμός ζητά ταυτόχρονη τροποποίηση και ανανέωση της άδειάς του (συχνό φαινόμενο στα αιολικά έργα λόγω αλλαγής τεχνολογίας ανεμογεννητριών). Πλέον, η ΑΕΠΟ που προκύπτει από τη διαδικασία αυτή λαμβάνει αυτόματα τη νέα 15ετή ισχύ, εμποδίζοντας τις υπηρεσίες να δίνουν μικρότερες ή αυθαίρετες παρατάσεις.

Επιπλέον, ο **N. 4951/2022** έθεσε αυστηρά χρονικά ορόσημα για τη διοίκηση, στοχεύοντας στη μείωση του συνολικού χρόνου έκδοσης της ΑΕΠΟ σε λιγότερες από 120-150 ημέρες, θεσπίζοντας την αποκλειστική προθεσμία των 30 ημερών για τις γνωμοδοτήσεις των αρμόδιων φορέων, μετά την πάροδο της οποίας η διαδικασία προχωρά αναγκαστικά.

Επίσης, μεγάλο ρόλο συνέβαλλε και η τεχνολογία της ψηφιοποίησης των εγγράφων μέσω του Ηλεκτρονικού Περιβαλλοντικού Μητρώου. Η πλήρης λειτουργία του μετέφερε το σύνολο της διαδικασίας στο ψηφιακό περιβάλλον. Από την υποβολή της Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ), τις γνωμοδοτήσεις των δασαρχείων και των αρχαιολογικών υπηρεσιών, έως τη δημόσια διαβούλευση και την τελική έκδοση της ΑΕΠΟ, τα πάντα διεκπεραιώνονται ηλεκτρονικά, προσφέροντας απόλυτη διαφάνεια και δυνατότητα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο.

Η μεγαλύτερη όμως τομή για την αντιμετώπιση της υποστελέχωσης των δημοσίων υπηρεσιών ήταν η θεσμοθέτηση των Πιστοποιημένων Ιδιωτών Αξιολογητών (ΠΙΑ). Πρόκειται για ανεξάρτητους ιδιώτες μηχανικούς και περιβαλλοντολόγους, εγγεγραμμένους σε επίσημο μητρώο, στους οποίους ο επενδυτής μπορεί να αναθέσει (και να πληρώσει απευθείας) την εξέταση του φακέλου του. Ο ΠΙΑ ελέγχει τη μελέτη και συντάσσει το σχέδιο της ΑΕΠΟ εντός αυστηρών χρονικών ορίων, αφήνοντας στην αρμόδια δημόσια υπηρεσία μόνο τον τελικό έλεγχο νομιμότητας και την υπογραφή.

Με βάση τις πρόσφατες Υπουργικές Αποφάσεις (με αποκορύφωμα τη νέα κατηγοριοποίηση), αναθεωρήθηκαν τα όρια ισχύος (σε Megawatt) που κατατάσσουν τα έργα σε περιβαλλοντικές κατηγορίες. Σκοπός ήταν να μην επιβαρύνονται μεσαίου μεγέθους έργα με τη δυσκίνητη διαδικασία της Κατηγορίας Α1 (έγκριση από το κεντρικό Υπουργείο) και να μεταφερθούν στην Κατηγορία Α2 (έγκριση από την εκάστοτε Αποκεντρωμένη Διοίκηση) ή στην Κατηγορία Β (Πρότυπες Περιβαλλοντικές Δεσμεύσεις - απαλλαγή από ΜΠΕ).

Ενδεικτικά, για τα χειρσαία αιολικά έργα:

- **Κατηγορία Α1** (Πολύ σημαντικές επιπτώσεις): Το όριο ορίστηκε στα >50 MW. Ωστόσο, εισήχθησαν κριτήρια περιβαλλοντικής ευαισθησίας, χαμηλώνοντας το όριο στα 35 MW εάν το έργο χωροθετείται εντός προστατευόμενων περιοχών του δικτύου Natura 2000.
- **Κατηγορία Β** (Αμελητέες/Τοπικές επιπτώσεις): Περιλαμβάνει μικρούς σταθμούς (έως 5 MW ή έργα με μία μόνο ανεμογεννήτρια έως 8 MW), οι οποίοι δεν χρειάζονται ΜΠΕ αλλά ακολουθούν τυποποιημένες δεσμεύσεις.
- **Κατηγορία Α2** (Σημαντικές επιπτώσεις): Όλες οι ενδιάμεσες περιπτώσεις που απαιτούν πλήρη ΜΠΕ και έκδοση ΑΕΠΟ από την Περιφέρεια/Αποκεντρωμένη Διοίκηση.

Η περιβαλλοντική αδειοδότηση απέκτησε πλέον και κλιματική διάσταση. Σε εφαρμογή του Εθνικού Κλιματικού Νόμου (**Ν. 4936/2022**), κάθε ΜΠΕ για έργα Κατηγορίας Α είναι ελλιπής εάν δεν περιλαμβάνει ειδικό κεφάλαιο ποσοτικοποίησης του ανθρακικού αποτυπώματος του έργου. Ο μηχανικός οφείλει να υπολογίσει τις άμεσες και έμμεσες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Score 1 και Score 2) κατά τη φάση κατασκευής και λειτουργίας και να καταθέσει συγκεκριμένο πλάνο για τη συνεχή μείωσή τους.

Ταυτόχρονα, σε ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο (με βάση τις ευρωπαϊκές οδηγίες και τη σχετική νομολογία του Συμβουλίου της Επικρατείας), παγιώθηκε η αρχή ότι τα έργα ΑΠΕ εξυπηρετούν ένα «υπέρτερο δημόσιο συμφέρον». Η νομική αυτή παραδοχή λειτουργεί ως ασπίδα για τα έργα, καθώς κατά τη δικαστική στάθμιση εννόμων συμφερόντων (π.χ. σε προσφυγές κατά των ΑΕΠΟ), η ανάγκη αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής υπερτερεί έναντι των γενικών τοπικών οχλήσεων, εκτός αν αποδειχθεί ανεπανόρθωτη βλάβη σε εξαιρετικά σπάνια στοιχεία της φύσης.

Στο πλαίσιο αυτό, και σε ευθυγράμμιση με το ευρωπαϊκό σχέδιο REPowerEU (το έκτακτο πλάνο της ΕΕ για την απεξάρτηση από τα ρωσικά ορυκτά καύσιμα μέσω της πράσινης μετάβασης), το οποίο μετέπειτα θεσμοθετήθηκε ως ευρωπαϊκός νόμος με την ευρωπαϊκή οδηγία RED III (που επιβάλλει δεσμευτικό στόχο για 42,5% ΑΠΕ στην Ευρώπη έως το 2030), εισήχθη ο πρωτοποριακός θεσμός των Περιοχών Επιτάχυνσης ΑΠΕ (Renewable Go-to Areas). Το κράτος αναλαμβάνει να χαρτογραφήσει περιοχές της χώρας με εξαιρετικό αιολικό ή ηλιακό δυναμικό, οι οποίες όμως βρίσκονται εκτός προστατευόμενων ζωνών (Natura, εθνικοί δρυμοί). Έργα που επιλέγουν να χωροθετηθούν εντός αυτών των προ-εγκεκριμένων ζωνών απολαμβάνουν εξαιρετικά γρήγορες fast-track διαδικασίες, οι οποίες περιλαμβάνουν ακόμη και πλήρη ή μερική απαλλαγή από το κλασικό καθεστώς της ΜΠΕ, καθώς η περιοχή έχει ήδη αξιολογηθεί συνολικά σε στρατηγικό επίπεδο.

Οικονομική αξιολόγηση επένδυσης αιολικού πάρκου

5.1 Ανάλυση των σταδίων εγκατάστασης αιολικού πάρκου

Η διαδικασία υλοποίησης ενός αιολικού πάρκου είναι μια πολυετής και σύνθετη πορεία, η οποία χωρίζεται σε τέσσερα διακριτές φάσεις, διασφαλίζοντας την τεχνική αρτιότητα και τη βιωσιμότητα της επένδυσης.

Φάση 1: Ανάπτυξης και Μελέτης Σκοπιμότητας

Διάρκεια: 1,5 – 3,5 έτη Αποτελεί το θεμέλιο λίθο του έργου και περιλαμβάνει τον στρατηγικό σχεδιασμό και την εξασφάλιση της τοποθεσίας. Τα στάδια αυτής της φάσης είναι:

- **Επιλογή Τοποθεσίας:** Εντοπισμός κατάλληλων εκτάσεων που πληρούν τις χωροταξικές προδιαγραφές (αποστάσεις από οικισμούς, Natura κ.λπ.).
- **Νομική Εξασφάλιση Γης:** Διαπραγματεύσεις και σύναψη συμφωνιών με τους ιδιοκτήτες της γης (ιδιώτες ή δημόσιο).
- **Τεχνική Ανάπτυξη:** Εγκατάσταση μετεωρολογικών ιστών για την ακριβή μέτρηση του αιολικού δυναμικού.
- **Χωροθέτηση (Micro-siting):** Καθορισμός των ακριβών θέσεων των ανεμογεννητριών και των τεχνικών χαρακτηριστικών του έργου.
- **Χρηματοδότηση:** Υποβολή αιτήσεων για δανειοδότηση και εξασφάλιση πόρων, μια διαδικασία που διαρκεί συνήθως 6 έως 18 μήνες.

Φάση 2: Προκατασκευαστική Φάση

Διάρκεια: 1 – 1,5 έτος (περιλαμβάνει και επιμέρους διαδικασίες λίγων μηνών). Σε αυτή τη φάση το έργο "ωριμάζει" διοικητικά και συμβατικά πριν την είσοδο των μηχανημάτων στο πεδίο. Τα στάδια αυτής της φάσης είναι:

- **Αδειοδοτική Διαδικασία:** Οριστικοποίηση και χορήγηση όλων των απαραίτητων αδειών (περιβαλλοντικών, αρχαιολογικών, δασικών).
- **Διαχείριση Πόρων:** Επιλογή προμηθευτών εξοπλισμού και εξασφάλιση των απαραίτητων υλικών.
- **Συμβασιοποίηση:** Τελικές διαπραγματεύσεις και υπογραφή των συμβολαίων κατασκευής (EPC contracts).

Φάση 3: Κατασκευής

Διάρκεια: 1 – 2 έτη Πρόκειται για την υλοποίηση του τεχνικού αντικειμένου στο χώρο εγκατάστασης. Τα στάδια αυτής της φάσης είναι:

- **Έργα Υποδομής:** Διάνοιξη οδοποιίας πρόσβασης και δημιουργία πλατειών ανέγερσης.
- **Ηλεκτρομηχανολογικές Εργασίες:** Θεμελίωση βάσεων, ανέγερση των πυλώνων, τοποθέτηση των ανεμογεννητριών και κατασκευή του υποσταθμού σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο.

Φάση 4: Λειτουργίας και Συντήρησης

Διάρκεια: 20 – 25 έτη (Κύκλος Ζωής) Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής, το έργο εισέρχεται στην παραγωγική του φάση. Τα στάδια αυτής της φάσης είναι:

- **Διαχείριση Λειτουργίας:** Συνεχής παρακολούθηση της ενεργειακής απόδοσης και της ασφάλειας του πάρκου.
- **Συντήρηση:** Προληπτικός έλεγχος των μηχανικών και ηλεκτρονικών μερών για την ελαχιστοποίηση των βλαβών και τη μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής της επένδυσης.

Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα Gantt της διαδικασίας υλοποίησης ενός τυπικού αιολικού πάρκου.

Φάση / Εργασία	Έτος 1	Έτος 2	Έτος 3	Έτος 4	Έτος 5	Έτος 6	Έτος 7-30
1. Ανάπτυξη & Σκοπιμότητα	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■				
- Επιλογή Τοποθεσίας & Γη	■ ■						
- Μετρήσεις Ανέμου		■ ■ ■ ■	■ ■				
- Χρηματοδότηση & Δάνεια			■ ■ ■ ■				
2. Προκατασκευαστική Φάση				■ ■ ■ ■	■ ■		
- Αδειοδότηση (ΑΕΠΟ κ.λπ.)				■ ■ ■ ■			
- Συμβόλαια & Πόροι					■ ■		
3. Φάση Κατασκευής					■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■	
- Έργα Υποδομής (Δρόμοι)					■ ■		
- Ανέγερση & Διασύνδεση						■ ■ ■ ■	
4. Λειτουργία & Συντήρηση							■ ■ ■ ■ ■ ...

Σχήμα 5.1: Διάγραμμα Gantt αιολικού πάρκου

5.1.1 Κριτήριο Επιλογής Εδάφους & Ανάπτυξης Αιολικού Πάρκου

Η χωροθέτηση ενός αιολικού πάρκου αποτελεί μια σημαντική και ταυτόχρονα πολύπλοκη διαδικασία βελτιστοποίησης, όπου η ενεργειακή απόδοση πρέπει να εναρμονιστεί με τους τεχνικούς περιορισμούς, τη γεωγραφική προσβασιμότητα και την περιβαλλοντική προστασία. Η επιτυχία μιας τέτοιας επένδυσης εξαρτάται από την ακρίβεια των αρχικών μελετών σκοπιμότητας και την ορθή αξιολόγηση των κριτηρίων που αναλύονται παρακάτω:

1. Πρώτον και σημαντικότερο κομμάτι είναι η επιλογή της έκτασης της εγκατάστασης του έργου. Πρέπει να διαμορφώνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να συσχετίζεται με τη τεχνολογία των Α/Γ και την απόδοση της ονομαστικής ισχύος του αιολικού πάρκου.
2. Η διαθέσιμη επιφάνεια πρέπει να επαρκεί για την κάλυψη της επιδιωκόμενης ονομαστικής ισχύος του σταθμού, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Κατά τον σχεδιασμό (Micro-siting), λαμβάνεται υπόψη το επιλεγμένο μοντέλο ανεμογεννήτριας (διάμετρος πτερωτής, ύψος πυλώνα) ώστε να τηρούνται οι απαραίτητες αποστάσεις μεταξύ των μηχανών. Αυτό είναι κρίσιμο σημείο για την αποφυγή του **φαινομένου της "σκίασης" (wake effect)**, το οποίο μειώνει την απόδοση των οπίσθιων ανεμογεννητριών λόγω των στροβιλισμών που προκαλούν οι εμπρόσθιες.
3. Η διασφάλιση των δικαιωμάτων χρήσης γης (ιδιωτικές μισθώσεις ή παραχωρήσεις δημόσιων εκτάσεων) αποτελεί προαπαιτούμενο για την εκκίνηση της αδειοδότησης.
4. Η μορφολογία του εδάφους αξιολογείται ως προς τη δυσκολία διάνοιξης οδοποιίας. Η μεταφορά των υπερμεγεθών εξαρτημάτων (πτερύγια μήκους άνω των 60-80 μέτρων) απαιτεί δρόμους με συγκεκριμένες προδιαγραφές κλίσης και ακτίνας στροφής.
5. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η ηχητική όχληση, που προκαλεί η Α/Γ απέναντι ως προς τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Για αυτό θα πρέπει κατά την κατασκευαστική περίοδο, να επιβάλλεται ο έλεγχος των επιπέδων θορύβου από τα βαρέα μηχανήματα και τις εκσκαφές, ειδικά σε περιοχές γειτνίασης με κατοικημένες ζώνες. Καθώς, ο σχεδιασμός του έργου να προβλέπει την τήρηση αποστάσεων ασφαλείας ώστε ο αεροδυναμικός θόρυβος των πτερυγίων να μην υπερβαίνει τα θεσμοθετημένα όρια στα πλησιέστερα κτίρια.
6. Στην επιλογή του εδάφους καθοριστικό ρόλο έχει και το αιολικό δυναμικό, που αναπτύσσεται στο χώρο αυτό. Το αιολικό δυναμικό σχετίζεται με την ταχύτητα του

ανέμου, που κατευθύνεται πάνω στα περύγια και η μελέτη της γίνεται βάσει ιστορικών δεδομένων από αιολικούς χάρτες και επιτόπιες μετρήσεις πάνω σε αυτό.

7. Η τιμή του αιολικού δυναμικού καθορίζει το όριο επενδυτικού ενδιαφέροντος. Για να θεωρηθεί μια περιοχή ελκυστική για επένδυση θα πρέπει η ταχύτητα του ανέμου να ξεπερνάει τα **5,5m/sec**. Οι τιμές που είναι κάτω από το όριο συνήθως δεν εξασφαλίζουν την απαιτούμενη απόδοση για την απόσβεση του υψηλού κεφαλαιακού κόστους. Κρατώντας αυτό ως απαραίτητη προϋπόθεση, η κατηγοριοποίηση καταλληλότητας μιας τοποθεσίας βάσει του αιολικού δυναμικού παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1 : Ταχύτητα του ανέμου και χαρακτηρισμός περιοχής

Ταχύτητα του ανέμου (m/sec)	Χαρακτηρισμός περιοχής
$v < 4$	Ανεπαρκές , Μη εκμεταλλεύσιμο δυναμικό
$4 < v < 5,5$	Χαμηλό , Περιορισμένη βιωσιμότητα συνήθως για μικρά συστήματα παραγωγής αιολικής ενέργειας
$5,5 < v < 7$	Μέσο , Ικανοποιητική απόδοση, τυπικό για πολλές χερσαίες εγκαταστάσεις
$7 < v < 9$	Υψηλό , Εξαιρετικό σημείο με υψηλή παραγωγικότητα
$v > 9$	Πολύ Υψηλό , Το δυναμικό του αέρα είναι στις βέλτιστες συνθήκες και συνήθως εντοπίζεται σε κορυφογραμμές και υπεράκτια (offshore)

Γενικά η καταγραφή του αιολικού δυναμικού πραγματοποιείται με σκοπό την άντληση δεδομένων για την ταχύτητα και την διεύθυνση του ανέμου συναρτήσει του χρόνου. Με τα δεδομένα αυτά, η βέλτιστη επιλογή τοποθεσίας θα πρέπει να είναι σύμφωνη με:

- Υψηλή μέση ταχύτητα του ανέμου.
- Υψηλό αιολικό δυναμικό, που σημαίνει μεγάλη διάρκεια ισχυρών ανέμων και περιορισμένη ύπαρξη περιόδων άπνοιας.
- Απουσία φραγμών του ανέμου και υψηλών εμποδίων.

Ακολουθώντας αυτά τα κριτήρια για την εγκατάσταση αιολικών πάρκων συνήθως επιλέγονται κορυφές λόφων με ανοιχτό ορίζοντα καθώς και ανοιχτές πεδιάδες, σε ακρογιαλιές ή τέλος σε ανοίγματα βουνών με πολύ έντονα ρεύματα αέρα.

Επιπλέον, είναι εξίσου σημαντικό να παρατηρείται πώς ακριβώς μεταβάλλεται η ταχύτητα του ανέμου σε σχέση με τη διάρκεια του έτους. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της κατανομής Weibull. Η κατανομή αυτή ακολουθεί ένα μοντέλο που δείχνει τις μεταβολές του ανέμου ως προς το χρόνο σε σχέση με το ποσοστό πιθανοτήτων, που μπορεί να παρουσιαστεί η συγκεκριμένη μέση ταχύτητα, ως προς το χρόνο.

8. Η επιλογή της θέσης εγκατάστασης και ο μετέπειτα τεχνικός σχεδιασμός ενός αιολικού πάρκου απαιτούν τη διεξοδική ανάλυση των τοπικών μετεωρολογικών συνθηκών. Οι περιβαλλοντικοί αυτοί παράγοντες επηρεάζουν άμεσα τόσο την ενεργειακή απόδοση όσο και τη δομική ακεραιότητα των Α/Γ. Οι παράγοντες που εξετάζονται είναι οι εξής:

- **Ατμοσφαιρική Υγρασία και Κατακρημνίσεις.** Η παρουσία νερού στην ατμόσφαιρα, υπό μορφή υγρασίας ή βροχόπτωσης δρα διττά στην απόδοση της μηχανής προκαλώντας:

α. **Οξείδωση.** Εμφανίζεται από τα υψηλά επίπεδα υγρασίας που επιταχύνουν στη διάβρωση των μεταλλικών μερών και των ηλεκτρονικών συστημάτων, με αποτέλεσμα να απαιτείται περισσότερη προστασία και συντήρηση του εξοπλισμού.

β. **Αεροδυναμική υποβάθμιση.** Η συγκέντρωση σταγονιδίων στην επιφάνεια των πτερυγίων αλλοιώνει το αεροδυναμικό προφίλ. Αυτό οδηγεί σε πρόωρη αποκόλληση του οριακού στρώματος και εμφάνιση του φαινομένου της απώλειας στήριξης (stall), μειώνοντας την παραγόμενη ισχύ.

γ. **Πυκνότητα του αέρα.** Η ισχύς που μεταφέρεται στον ρότορα είναι ανάλογη της πυκνότητας του αέρα. Συνεπώς, συνθήκες χαμηλής υγρασίας (ξηρός αέρας) ή χαμηλών θερμοκρασιών, που αυξάνουν την πυκνότητα του ατμοσφαιρικού αέρα, ενισχύουν την απόδοση της ανεμογεννήτριας.

- **Φαινόμενα Παγετού και Μηχανικές Καταπονήσεις**

Η επικάλυψη πάγου (icing) αποτελεί έναν από τους κρισιμότερους κινδύνους για τις εγκαταστάσεις σε μεγάλα υψόμετρα, όπως:

α. **Φορτία και Καταπονήσεις.** Ο πάγος αυξάνει το στατικό βάρος και τη δυναμική ανισορροπία των πτερυγίων, προκαλώντας έντονες μηχανικές καταπονήσεις στην πλήμνη και τον πυλώνα.

β. **Ασφάλεια και Λειτουργία.** Μπορεί να υπάρξει κίνδυνος εκτόξευσης τμημάτων πάγου κατά την περιστροφή, ενώ ο παγετός μπορεί να αχρηστεύσει τα όργανα μέτρησης (ανεμόμετρα), οδηγώντας σε εσφαλμένη λειτουργία των συστημάτων ελέγχου.

- **Υψόμετρο και Θερμοκρασία**

Η αποδιδόμενη ισχύς μιας Α/Γ είναι άμεσα εξαρτημένη από την πυκνότητα του αέρα, η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με το υψόμετρο και τη θερμοκρασία. Σε μεγάλα υψόμετρα ή υψηλές θερμοκρασίες, ο αέρας είναι λιγότερο πυκνός, γεγονός που μειώνει την κινητική ενέργεια που μπορεί να εξαχθεί από τον άνεμο. Για αυτό η μελέτη πρέπει να προβλέπει την προσαρμογή των καμπυλών ισχύος στις συγκεκριμένες συνθήκες της τοποθεσίας.

- **Δυναμική του Ανέμου – Ακραία Φαινόμενα και Τύρβη**

Η ποιότητα του αιολικού πεδίου καθορίζει τη διάρκεια ζωής της κατασκευής.

α. **Υπερβολικά Ισχυροί Άνεμοι ($V > 9$ Beaufort)** στις περιοχές με συχνές θύελλες, επιλέγονται Α/Γ ανώτερης αιολικής κλάσης, οι οποίες διαθέτουν ενισχυμένη στιβαρότητα και συστήματα ασφαλούς παύσης (cut – out).

β. **Έντονη Τύρβη (Turbulence)** οι διαρκείς μεταβολές στην ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου προκαλούν φαινόμενα κόπωσης των υλικών (fatigue). Η υψηλή τυρβώδης ένταση μειώνει το χρόνο ζωής της Α/Γ και αυξάνει κατακόρυφα το κόστος συντήρησης.

γ. **Η Σταθερότητα Ροής** του ανέμου εξασφαλίζει ομαλή λειτουργία, ελαχιστοποιώντας τις δυναμικές καταπονήσεις στο σύστημα μετάδοσης κίνησης.

- **Αερομεταφερόμενα Σωματίδια και Διάβρωση**

Η παρουσία σκόνης, άμμου ή άλλων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα λειτουργεί λειαντικά προκαλώντας σταδιακή διάβρωση της ακμής προσβολής (leading edge erosion) των πτερυγίων, η οποία υποβαθμίζει την αεροδυναμική απόδοση σε βάθος χρόνου. Σε αυτό το σημείο χρειάζεται ειδική επικάλυψη των πτερυγίων

και συχνότερος καθαρισμός σε περιοχές με έντονη παρουσία αιωρούμενων σωματιδίων.

9. Η επιλογή της θέσης εγκατάστασης μιας ανεμογεννήτριας δεν εξαρτάται αποκλειστικά από το ονομαστικό αιολικό δυναμικό της περιοχής, αλλά επηρεάζεται καθοριστικά από την ποιότητα της ροής του ανέμου και τα γεωφυσικά χαρακτηριστικά του εδάφους.

- Ατμοσφαιρική Τύρβη και Λειτουργική Απόδοση. Είναι σύνηθες το φαινόμενο της μειωμένης ενεργειακής απόδοσης ανεμογεννητριών σε περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό. Η αιτία εντοπίζεται στην έντονη τύρβη (turbulence), όπως προαναφέρθηκε η οποία δημιουργεί ένα μεταβαλλόμενο πεδίο ροής. Οι παράγοντες της τύρβης οφείλονται στην ένταση της τύρβης, η οποία συναρτάται με τις γενικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, την τραχύτητα του εδάφους και την παρουσία μεμονωμένων εμποδίων. Οι επιπτώσεις της τυρβώδους ροής προκαλούν συνεχώς μεταβολές στο φορτίο της πτερωτής, αυξάνοντας την μηχανική κόπωση και μειώνοντας την απόδοση της μετατροπής της σε αιολική ενέργεια.

- Ανάλυση Πεδίου Ροής σε Επίπεδο Έδαφος

Σε τοποθεσίες με ομαλό ανάγλυφο θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή σε εμπόδια που διαταράσσουν το οριακό στρώμα και αυτά είναι:

- α. Η παρουσία δέντρων έχει ως αποτέλεσμα να μηδενίζει τη ταχύτητα του ανέμου μέχρι το ύψος της κορυφής τους. Το οριακό στρώμα επιρροής αναπτύσσεται κατάντη των δέντρων, σε ύψος τουλάχιστον πέντε έως έξι φορές το μέσο ύψος τους. Για τη μέγιστη απόδοση, η πτερωτή της ανεμογεννήτριας πρέπει να χωροθετείται εκτός αυτής της ζώνης επιρροής.
- β. Εκτός από την παρουσία δέντρων το ίδιο ή παρόμοιο μπορεί να συμβεί και με την ύπαρξη πολλών κτηρίων στην τοποθεσία. Τα παρακείμενα κτήρια μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές διαταραχές. Οι οξείες γωνίες των κτιρίων λειτουργούν ως πηγές εκροής στροβίλων, τροποποιώντας πλήρως τα χαρακτηριστικά της ροής και καθιστώντας το πεδίο ακατάλληλο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

- Σχεδιασμός σε Περιβάλλον Ανώμαλης Μορφολογίας

Σε περιοχές με έντονο και ανώμαλο ανάγλυφο, κάθε περίπτωση απαιτεί εξειδικευμένη προσέγγιση, καθώς η ροή του ανέμου επηρεάζεται από τις τοπικές γεωμετρικές μεταβολές. Για αυτό ακολουθούνται κάποιες διαδικασίες:

- α. Για αρχή πρέπει να πραγματοποιούνται μελέτες είτε με τη χρήση πειραματικών ομοιωμάτων σε αεροδυναμικές σήραγγες είτε με προηγμένα λογισμικά Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD) με μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης.
- β. Παρά την πολυπλοκότητα, ορισμένες τοπογραφικές μορφές μπορούν να τυποποιηθούν, προσφέροντας κρίσιμες κατευθυντήριες γραμμές κατά την προκαταρκτική φάση της χωροθέτησης.

- Θεσμικοί, Περιβαλλοντικοί και Γεωτεχνικοί Περιορισμοί

Πέρα από τα αεροδυναμικά κριτήρια, η χωροθέτηση υπόκειται σε αυστηρό νομικό και γεωτεχνικό πλαίσιο:

- α. Η χρήση γης περιορίζεται από κανονισμούς που αφορούν την προστασία αρχαιολογικών χώρων και τη διατήρηση ευαίσθητων οικοσυστημάτων (π.χ. περιοχές Natura 2000).
- β. Ένα σενάριο που πρέπει να παρατηρηθεί είναι η επικινδυνότητα του εδάφους. Αποφεύγονται περιοχές με υψηλή σεισμικότητα ή κίνδυνο κατολισθήσεων. Επίσης, εξαιρετικά βραχώδη εδάφη ενδέχεται να απορριφθούν λόγω του υψηλού κόστους θεμελίωσης και των δυσκολιών μεταφοράς του εξοπλισμού.

- Τάσεις στη Διαχείριση και Χρήση Γης

Η σύγχρονη τάση στην ανάπτυξη αιολικών πάρκων στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της απαιτούμενης έκτασης μέσω:

- α. Μεγιστοποίηση Ισχύος δηλαδή με τη χρήση και εγκατάσταση μεγαλύτερων ανεμογεννητριών (μεγαλύτερη ισχύς ανά μονάδα), που οδηγεί σε μικρότερο συνολικό αριθμό μηχανών.
- β. Και στην βελτιστοποίηση διάταξης με σκοπό την πυκνότερη και στρατηγικότερη τοποθέτηση των μονάδων εντός του πάρκου για τη βέλτιστη εκμετάλλευση του διαθέσιμου χώρου, χωρίς να παραβιάζονται οι αποστάσεις ασφαλείας για το φαινόμενο της σκίασης.

5.1.2 Κριτήρια Επιλογής Και Τεχνικές Προδιαγραφές Ανεμογεννήτριας

Η επιλογή του καταλληλότερου τύπου ανεμογεννητριών για τη σύνθεση ενός Αιολικού Πάρκου (Α/Π) αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία βελτιστοποίησης. Στόχος είναι η μεγιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγής σε συνάρτηση με το κόστος και τους περιορισμούς του πεδίου εγκατάστασης.

Για την οριστικοποίηση του τύπου των Α/Γ, εξετάζονται διεξοδικά οι ακόλουθες παράμετροι:

1. Οικονομοτεχνικοί Παράγοντες

Σε αυτή παραγοντοποίηση εξετάζονται τα εξής:

- **Καμπύλη Ισχύος (Power Curve):** Αποτελεί το σημαντικότερο τεχνικό χαρακτηριστικό, καθώς απεικονίζει την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ σε συνάρτηση με την ταχύτητα του ανέμου. Η επιλογή γίνεται με βάση το αιολικό δυναμικό της περιοχής, ώστε η Α/Γ να λειτουργεί όσο το δυνατόν περισσότερες ώρες στην ονομαστική της ισχύ.
- **Γεωμετρικές Διαστάσεις και Χωροταξική Διάταξη:** Οι διαστάσεις της Α/Γ (διάμετρος ρότορα και ύψος πυλώνα) πρέπει να εναρμονίζονται με τη διαθέσιμη έκταση του γηπέδου. Η επιθυμητή συνολική ισχύς του πάρκου καθορίζει τον αριθμό και την πυκνότητα τοποθέτησης των μονάδων, λαμβάνοντας υπόψη τις αποστάσεις ασφαλείας για την αποφυγή αεροδυναμικών παρεμβολών.
- **Περιβαλλοντικοί και Χωροταξικοί Περιορισμοί:** Εξετάζονται οι επιπτώσεις ως προς την οπτική όχληση και τα επίπεδα θορύβου. Σε περιοχές με αυστηρό προστατευτικό πλαίσιο, επιλέγονται μοντέλα με προηγμένα συστήματα μείωσης ακουστικών εκπομπών.
- **Εφοδιαστική Αλυσίδα και Κατασκευή:** Η προσβασιμότητα της περιοχής επηρεάζει την επιλογή, καθώς η μεταφορά πτερυγίων μεγάλου μήκους και βαρέων τμημάτων του πυλώνα απαιτεί συγκεκριμένες οδικές υποδομές και γερανοφόρα οχήματα μεγάλης ανυψωτικής ικανότητας.
- **Οικονομική Προσφορά και Συντήρηση:** Αξιολογείται το κόστος κύκλου ζωής (Life Cycle Cost), το οποίο περιλαμβάνει την αρχική δαπάνη αγοράς και το πρόγραμμα προληπτικής και διορθωτικής συντήρησης που προσφέρει ο κατασκευαστής (OEM).

2. Αεροδυναμική Διάταξη Ρότορα

Σε αυτό το επίπεδο για τις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα υπάρχουν δύο κατηγορίες, που σχετίζονται τη θέση του ρότορα σε σχέση με τον πυλώνα και την κατεύθυνση του ανέμου. Αυτές είναι:

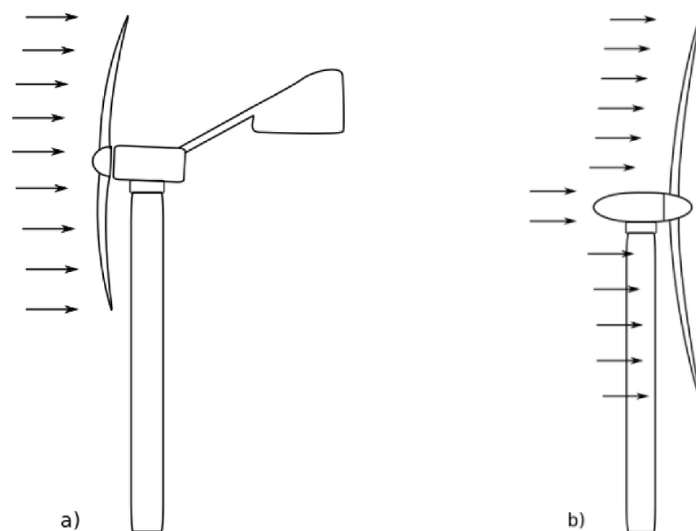
- **Προσήμενη Διάταξη (Upwind Configuration)**

Στην προσήμενη διάταξη, ο ρότορας είναι τοποθετημένος μπροστά από τον πυλώνα, με αποτέλεσμα ο άνεμος να προσπίπτει πρώτα στα πτερύγια. Έτσι, αποφεύγεται η "σκιά του πυλώνα", δηλαδή η τύρβη που δημιουργείται πίσω από τον πύργο, με αποτέλεσμα την ομαλότερη παραγωγή ισχύος και τη μείωση του θορύβου. Ωστόσο, απαιτείται στιβαρότητα των πτερυγίων για την αποφυγή πρόσκρουσής τους στον πυλώνα λόγω κάμψης, καθώς και μηχανισμός προσανατολισμού (yaw system) για τη διαρκή ευθυγράμμιση με τον άνεμο.

- **Υπήμενη Διάταξη (Downwind Configuration)**

Στην υπήμενη διάταξη (Εικ 5.1), ο ρότορας βρίσκεται πίσω από τον πυλώνα, ο οποίος "σκιάζει" τα πτερύγια πριν την επαφή τους με τον άνεμο.

Οι Α/Γ αυτές έχουν την τάση να αυτό – προσανατολίζονται (passive yaw), γεγονός που σε ορισμένες περιπτώσεις καταργεί την ανάγκη για ενεργό σύστημα ελέγχου ή ουρά κατεύθυνσης. Παρ' όλα αυτά, η διέλευση των πτερυγίων από την περιοχή χαμηλής πίεσης πίσω από τον πυλώνα προκαλεί αυξημένες μηχανικές καταπονήσεις (παλμικά φορτία) και υψηλότερα επίπεδα θορύβου.



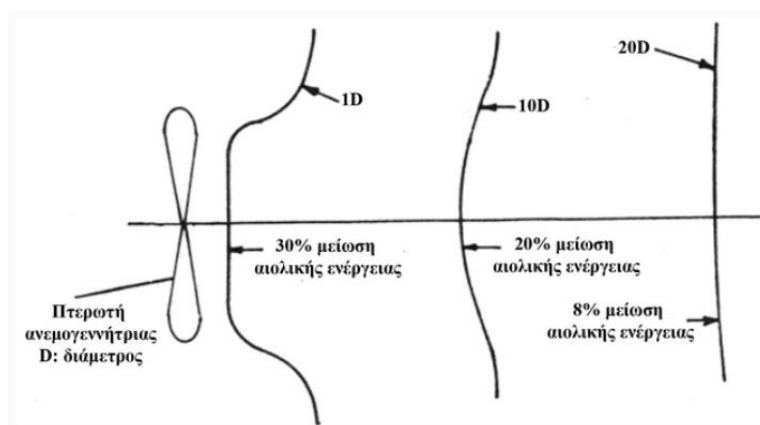
Εικόνα 5.1: Προσήμενη και Υπήμενη διάταξη ανεμογεννητριών

5.1.3 Χωροθέτηση και Ενεργειακός Σχεδιασμός Αιολικού Πάρκου

Με την ολοκλήρωση της αιολικής εκτίμησης και την πιστοποίηση του αξιοποιήσιμου δυναμικού, το έργο εισέρχεται στη φάση του **τεχνικού σχεδιασμού**. Η φάση αυτή ενσωματώνει την τοπογραφική ανάλυση, τη βελτιστοποίηση της χωροθέτησης (Micro-siting) και την εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης.

Όπως έχει προαναφερθεί η επιλογή του τύπου της Α/Γ αποτελεί συνάρτηση των ανεμολογικών δεδομένων και της γεωμορφολογίας της περιοχής. Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει:

- **Χωροθέτηση (Micro-siting):** Τον προσδιορισμό των ακριβών συντεταγμένων εγκατάστασης κάθε μονάδας.
- **Ενεργειακή Μελέτη:** Την πρόβλεψη της αναμενόμενης ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Έργα Υποδομής:** Τον σχεδιασμό της εσωτερικής οδοποιίας και του ηλεκτρικού δικτύου διασύνδεσης με το Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας.



Εικόνα 5.2: Το φαινόμενο σκίασης

Επίσης, η χωροθέτηση διέπεται από αυστηρούς κανονισμούς ασφαλείας και αεροδυναμικής απόδοσης όπως:

- **Ζώνη Ασφαλείας:** Σύμφωνα με το ισχύον κανονιστικό πλαίσιο, κάθε Α/Γ περιβάλλεται από μια ζώνη ασφαλείας ακτίνας **36 μέτρων** από το κέντρο του πυλώνα.
- **Φαινόμενο Σκίασης (Wake Effect):** Για την ελαχιστοποίηση των αεροδυναμικών παρεμβολών που μειώνουν την παραγωγή και καταπονούν μηχανικά τις μηχανές, η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των Α/Γ ορίζεται στις **2,5 φορές και πάνω από τη διάμετρο** του ρότορα (D_r). Το φαινόμενο της σκίασης (Εικ. 5.2) ή αλλιώς το

φαινόμενο της ουράς παρουσιάζεται όταν ο άνεμος περνά από τα πτερύγια της πρώτης Α/Γ, αναταράσσεται και χάνει ένα μέρος της ταχύτητάς του. αν η επόμενη τοποθετηθεί πολύ κοντά στην πρώτη θα δεχθεί αυτόν τον αέρα θα δουλεύει και θα παράγει λιγότερη ενέργεια και θα φθείρεται ταχύτερα το κιβώτιο ταχυτήτων της λόγω των κραδασμών που δημιουργούνται.

Για τον βέλτιστο σχεδιασμό, ορίζονται δύο βασικές αποστάσεις ως πολλαπλάσια της διαμέτρου του ρότορα (D_r).

1. Απόσταση μεταξύ σειράς (D_{cw} - Crosswind):

Η απόσταση εντός σειράς για το αιολικό πάρκο αναφέρεται στην απόσταση μεταξύ των Α/Γ που είναι τοποθετημένες στην ίδια σειρά αλλά σε κάθετη διάταξη ως προς την κατεύθυνση του επικρατούντος ανέμου. Το εύρος τιμών της κυμαίνεται συνήθως σε 3D και 5D. Ο λόγος που επιλέγεται αυτό το εύρος τιμών είναι για αποφυγή πλευρικής επικάλυψης (Wake Effect) και για να υπάρχει ανοχή, μεταξύ των Α/Γ, σε αλλαγές της κατεύθυνσης του ανέμου.

Σε ορεινά ανάγλυφα (όπως συμβαίνει συχνά στην Ελλάδα), η crosswind απόσταση ακολουθεί συνήθως τις κορυφογραμμές (ridges). Οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται «σε σειρά» πάνω στην κορυφή (εγκάρσιως στον επικρατούντα άνεμο) για να εκμεταλλευτούν το φαινόμενο της επιτάχυνσης του εδάφους (speed-up effect), διατηρώντας αυτές τις ελάχιστες αποστάσεις ασφαλείας μεταξύ τους.

$$D_{cw} = \text{με το πολλαπλάσιο της διάστασης του ρότορα} \cdot D_r$$

2. Απόσταση εντός σειρών (D_{dw} - Downwind):

Η απόσταση εντός σειράς σε ένα αιολικό πάρκο αναφέρεται στην απόσταση που έχουν μεταξύ τους οι ανεμογεννήτριες οι οποίες είναι τοποθετημένες στην ίδια σειρά, ακολουθώντας την κατεύθυνση του επικρατούντος ανέμου. Η απόσταση αυτή εξαρτάται αποκλειστικά από τη διάμετρο της φτερωτής (D) της Α/Γ. Στη διεθνή πρακτική, η απόσταση εντός σειράς κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 5D έως 8D. Δηλαδή, 5 έως 8 φορές τη διάμετρο του ρότορα. Η απόσταση των Α/Γ σε σειρά πρέπει να βρίσκεται σε αυτό εύρος τιμών, που προαναφέρθηκαν, επειδή δεν είναι επιθυμητό να είναι κοντά η μία στην άλλη σε απόσταση 3D λόγω αεροδυναμικών απωλειών. Επίσης, σε αυτή την απόσταση (3D) η δεύτερη με την πρώτη θα δέχεται αυξημένη τύρβη, που θα καταπονεί τρομερά τα μηχανικά μέρη, το κιβώτιο ταχυτήτων και τα πτερύγια της, μειώνοντας σημαντικά τον χρόνο ζωής της και αυξάνοντας τα έξοδα συντήρησης.

Ωστόσο, αυξάνοντας υπερβολικά την απόσταση εντός σειράς (έως 12D) θα χρειαζόταν να διατεθεί τεράστια έκταση γης, να γίνουν μεγάλες και μακρινές ηλεκτρολογικές

εγκαταστάσεις καλωδίων συνδεδεμένες με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, αυξημένες ηλεκτρικές απώλειες λόγω των αποστάσεων και υψηλότερο κόστος οδοποιίας και κατασκευής. Τέτοιες μεγάλες αποστάσεις είναι συχνά ανεφάρμοστες λόγω του έντονου ανάγλυφου του εδάφους ή των αυστηρών χωροταξικών περιορισμών σε προστατευόμενες ζώνες.

$$D_{dw} = \text{με το πολλαπλασιο της διάστασης του ρότορα} \cdot D_r$$

Το γινόμενο των δύο αυτών αποστάσεων $D_{cw} \cdot D_{dw}$ προσδιορίζει τη θεωρητική «επιφάνεια επιρροής» ανά ανεμογεννήτρια. Με βάση αυτή τη γεωμετρία υπολογίζεται το συνολικό εμβαδόν της ιδεατής εγκατάστασης του αιολικού πάρκου, διασφαλίζοντας τις ελάχιστες αποστάσεις ασφαλείας και τη βέλτιστη ενεργειακή απόδοση.

Οι αποστάσεις αυτές απεικονίζονται και στις εικόνες 5.3 και 5.4.

Εκτός από το βασικό μοντέλο $D_{cw} \cdot D_{dw}$ η διεθνής πρακτική (π.χ. **Rise National Laboratory, NREL**) προτείνει εναλλακτικές διατάξεις ανάλογα με την ένταση της τύρβης και την κατεύθυνση του επικρατούντος ανέμου:

- **Μοντέλο Τετραγωνικής Διάταξης ($5 \cdot D_r$ $7 \cdot D_r$):** Χρησιμοποιείται συχνά σε περιοχές όπου η διεύθυνση του ανέμου παρουσιάζει μεγάλη μεταβλητότητα. Εξασφαλίζει μέση απόσταση προς όλες τις κατευθύνσεις.
- **Μοντέλο Ρομβοειδούς/Εναλλακτικής Διάταξης (Staggered Layout):** Οι Α/Γ της δεύτερης σειράς τοποθετούνται στα ενδιάμεσα κενά της πρώτης σειράς. Αυτό επιτρέπει τη μείωση της απόστασης D_{dw} (downwind) έως και $5 \cdot D_r - 6 \cdot D_r$, καθώς ο "διάδρομος" του ανέμου παραμένει πιο καθαρός.

Η παρούσα διπλωματική εργασία, όπως θα δείτε και στο Κεφάλαιο 6, επικεντρώνεται περισσότερο στο βασικό μοντέλο χωροθέτησης. Δηλαδή στο μοντέλο $D_{cw} \cdot D_{dw}$.

Με τη χρήση του μοντέλου αυτού μπορεί να γίνει υπολογισμός της ισχύος και των διαστάσεων στο χώρο της εγκατάστασης. Για να γίνει αντιληπτό πώς χρησιμοποιείται το μοντέλο παρουσιάζεται το παρακάτω παράδειγμα.

Έστω αιολικό πάρκο με $N=40$ όμοιες ανεμογεννήτριες, τύπου Vestas V150, με ονομαστική ισχύ $P_{tur}=4.2MW$ και ύψος πλήμνης $h_t=105m$ η κάθε μία.

Δεδομένου ότι το κατασκευαστικό μοντέλο της ανεμογεννήτριας υποδηλώνει και την διάμετρο του ρότορα, για το Vestas V 150, προκύπτει ότι η διάμετρος του ρότορα είναι 150m.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα έχουμε:

- Συνολική Ονομαστική Ισχύς(P_{wf}):

$$P_{wf} = N \cdot P_{tur} = 40 \cdot 4,2 = 168 \text{ MW}$$

- Γεωμετρική Διάταξη

Το πλήθος των ανεμογεννητριών είναι 40 οπότε θα είναι βολικό να τοποθετηθούν 4 σειρές ($N_{col}=4$) των 10 ανεμογεννητριών ($N_{row}=10$). Με αυτή τη διάταξη θα υπολογιστούν το μήκος σειράς και τη κάθετη απόσταση σειρών. Προτού γίνουν οι υπολογισμοί αυτοί θα πρέπει να υπολογιστούν οι συντελεστές απόστασης. Οπότε, προκύπτουν οι εξής υπολογισμοί:

- Συντελεστές απόστασης:

$$D_{cw} = 4 \cdot D_r = 4 \cdot 150 = 600m \text{ (πλευρικό)}$$

$$D_{dw} = 8 \cdot D_r = 8 \cdot 150 = 1200 \text{ (κατά μήκος)}$$

- Συνολικό Μήκος Σειράς (D_{row}):

$$D_{row} = (N_{row} - 1) \cdot D_{cw} = (10 - 1) \cdot (4 \cdot 150) = 5400m$$

- Συνολική Κάθετη Απόσταση Σειρών (D_{col}):

$$D_{col} = (N_{col} - 1) \cdot D_{dw} = (4 - 1) \cdot (8 \cdot 150) = 3600m$$

- Συνολική επιφάνεια (A):

$$A = D_{row} \cdot D_{col} = 5400 \cdot 3600 = 19440000 \text{ m}^2 = 19440 \text{ στρέμματα}$$

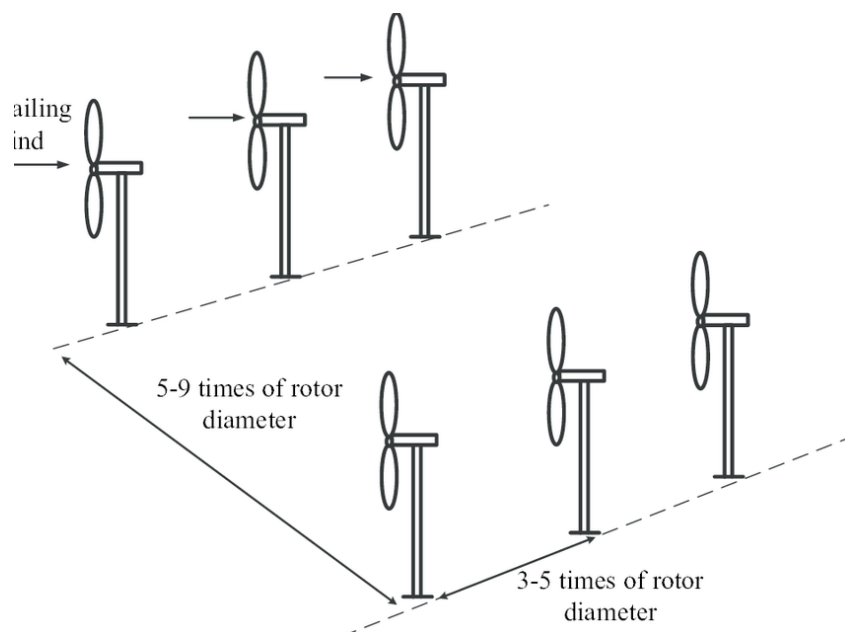
- Περίφραξη και Ασφάλεια εγκατάστασης:

Για την αποφυγή και την διασφάλιση της εγκατάστασης, υπολογίζεται και το συνολικό μήκος της περίφραξης (D_{fence}). Ο υπολογισμός λαμβάνει υπόψη το ύψος της πλήμνης (h_t) και τη διάμετρο του ρότορα. Ουσιαστικά είναι η περίμετρος της εγκατάστασης.

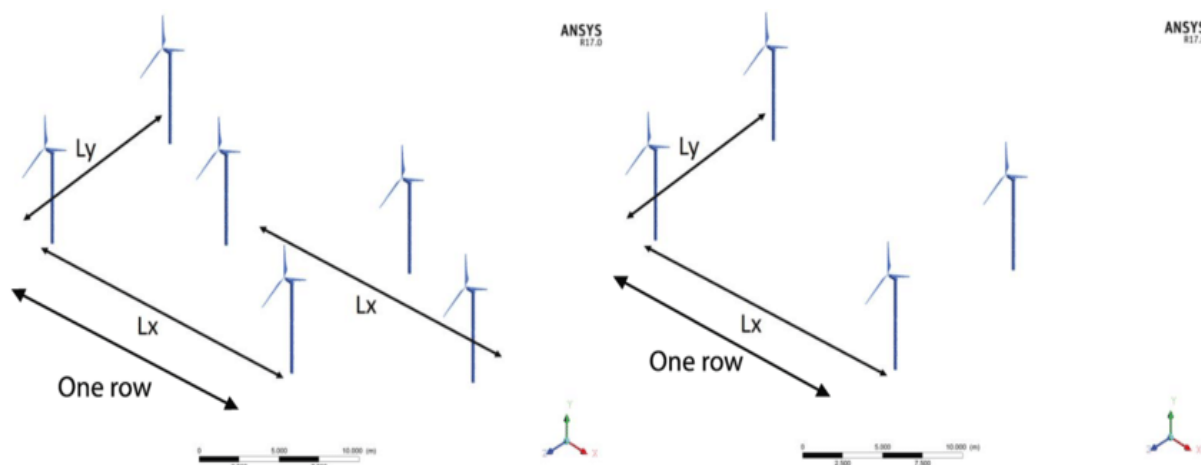
Με δεδομένα το ύψος της πλήμνης να είναι 105m και η διάμετρος του ρότορα να είναι στα 150m. Ο τύπος της περιμέτρου διαμορφώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} D_{fence} &= 2 \cdot (D_{row} + 2h_t + D_r) + 2 \cdot (D_{col} + 2h_t + D_r) \\ &= 2 \cdot (5400 + 210 + 150) + 2 \cdot (3600 + 210 + 150) \\ &= 2 \cdot 5760 + 2 \cdot 3960 = 11520 + 7920 = 19440m \end{aligned}$$

Συνεπώς, η περίφραξη – περίμετρος είναι 19,44km.



Εικόνα 5.3: Η χωροθέτηση των ανεμογεννητριών



Εικόνα 5.4: Η χωροθέτηση των ανεμογεννητριών ανά συστοιχία

5.2 Κόστος Κατασκευής αιολικού πάρκου

5.2.1 Ανάλυση Οικονομικής Βιωσιμότητας και Κόστους Κατασκευής Αιολικών Πάρκων

Σύμφωνα με το IRENA (International Renewable Energy Agency) και την επιστημονική έκθεσή της με τίτλο «Renewable Power Generation Costs in 2024» (έκδοση Ιούλιος 2025), η ανάλυση του κόστους αγοράς για την υλοποίηση ενός αιολικού έργου δεν περιορίζεται μόνο στην αγορά των ανεμογεννητριών, αλλά θα πρέπει να βασίζεται σε τρεις βασικούς «πυλώνες» που σηματοδοτούν την κοστολόγηση του έργου, ήτοι:

1. Οι Κεφαλαιουχικές Δαπάνες του πάρκου, **CAPEX** (Capital Expenditures), οι οποίες ουσιαστικά αποτελούν το αρχικό κόστος του έργου.

2. Οι Λειτουργικές Δαπάνες του πάρκου, **OPEX** (Operational Expenditures), οι οποίες περιλαμβάνουν το κόστος λειτουργίας και συντήρησης.
3. Το κόστος δανεισμού και η απόδοση κεφαλαίου, **WACC** (Weighted Average Cost of Capital).

Για την ανάλυση, σημαντικό δείκτη αποτελεί ο δείκτης **LCOE** (Levelized Cost of Electricity), ο οποίος αντιπροσωπεύει το μέσο κόστος ανά παραγόμενη μονάδα ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του έργου.

5.2.2 Δομή κόστους και Τεχνική Υλοποίηση Αιολικών Πάρκων Αναλυτική Κατανομή του CAPEX

Σύμφωνα με το IRENA το κόστος κατασκευής (CAPEX) για ένα χερσαίο αιολικό πάρκο (onshore) κυμαίνεται διεθνώς 1,1\$ - 1,4\$ ανά MW εγκατεστημένης ισχύος.

Η κατανομή κόστους CAPEX εξαρτάται από:

- τον τύπο της ανεμογεννήτριας
- το κόστος έργων Πολιτικού Μηχανικού για την εγκατάσταση
- την ηλεκτρολογική Διασύνδεση
- τα λοιπά έξοδα

Πιο αναλυτικά, το αρχικό κόστος μιας αιολικής εγκατάστασης κατανέμεται ως εξής:

1. Το Αιολικό Σύστημα, το οποίο αποτελεί τον κύριο πυρήνα του έργου μιας και αποτελεί το 65 – 75% του συνολικού κόστους. Μέσα στο κόστος αυτό περιλαμβάνονται:
 - Ο ρότορας και τα πτερύγια αποτελούν το 20 – 25% του κόστους της μηχανής. Τα πτερύγια είναι το δυναμικό μέρος της κατασκευής. Το κόστος τους έχει αυξηθεί λόγω του μεγέθους τους το οποίο ξεπερνάει τα 80 μέτρα για τα χερσαία έργα. Είναι ακριβά διότι το υλικό, από το οποίο είναι κατασκευασμένα, αποτελείται από υαλόπλεγμα (fiberglass), ένα σύνθετο υλικό που αποτελείται από εξαιρετικά λεπτές ίνες γυαλιού πλεγμένες μεταξύ τους, και από ανθρακονήματα (carbon fiber) στα άκρα για μείωση του βάρους, κάνοντας τα πτερύγια ελαφριά και ανθεκτικά στις δυνάμεις του αέρα. Στα πτερύγια περιλαμβάνεται το σύστημα Pitch, το οποίο περιέχει υδραυλικούς ή ηλεκτρικούς κινητήρες για την στρέψη των πτερυγίων και την ρύθμιση της ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων. Στο εν λόγω κόστος,

συμπεριλαμβάνεται και το κόστος μεταφοράς, η οποία πραγματοποιείται από ειδικά οχήματα και συνοδεία.

- Η άτρακτος είναι το μηχανικό κομμάτι της ανεμογεννήτριας και το πιο ακριβό εξάρτημα με το κόστος της να κυμαίνεται στο 45 – 50% της Α/Γ καθώς περιλαμβάνει τα ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα. Αυτά είναι το κιβώτιο ταχυτήτων (gearbox), το οποίο είναι το πιο επιρρεπές σε βλάβες σημείο και κοστίζει περίπου το 13% της ατράκτου. Ακολουθεί σε κόστος η γεννήτρια, δηλαδή η κινητήρια μηχανή που μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Υπάρχουν πολλών ειδών γεννήτριες με πιο ακριβές αυτές μόνιμου μαγνήτη λόγω της χρήσης σπάνιων γαιών (Νεοδύμιο, κλπ) κάνοντάς τις πιο αποδοτικές, με το κόστος της να κυμαίνεται από 120 έως 200 χιλ. ευρώ ανά MW. Ακολουθεί το σύστημα προσανατολισμού (Yaw system), το οποίο στρέφει την άτρακτο προς την κατεύθυνση του ανέμου, με το κόστος να κυμαίνεται περίπου 40 με 65 χιλ. ευρώ και αποτελεί το 2 – 3,5% του συνολικού κόστους της ατράκτου. Τέλος, ο μετατροπέας (Converter) και ο Μετασχηματιστής, οι οποίοι ρυθμίζουν την ποιότητα του ρεύματος πριν από αυτό φύγει από την τουρμπίνα, με το κόστος και των δύο μαζί να είναι μεταξύ περίπου 140 και 230 χιλ. ευρώ. Με τον μετατροπέα να στοιχίζει περίπου 90 – 140 χιλ. ευρώ αποτελώντας το 5 με 7% του συνολικού κόστους της ανεμογεννήτριας. Και ο μετασχηματιστής με εκτίμηση κόστους στα 50 – 90 χιλ. ευρώ.
- Ο πυλώνας, με κόστος της κατασκευής του να κυμαίνεται από 18 – 22% από το συνολικό κόστος της Α/Γ. Το κόστος του πυλώνα εξαρτάται άμεσα από την τιμή του χάλυβα και το ύψος πλήμνης. Τα υλικά από τα οποία αποτελείται είναι συνήθως κωνικοί χαλύβδινοι σωλήνες. Σε μεγάλα ύψη ($h > 120\text{m}$) χρησιμοποιούνται υβριδικοί πυλώνες με βάση από σκυρόδεμα και κορυφή από χάλυβα για μείωση του κόστους υλικών. Εσωτερικά στο πύργο υπάρχουν σκάλες, ανελκυστήρες για το προσωπικό και καλωδίωση από εγκαταστάσεις ισχύος.

2. Έργα Πολιτικού Μηχανικού

Το κύριο έργο πολιτικού μηχανικού είναι η κατασκευή της θεμελίωσης και της βάσης έδρασης της κάθε ανεμογεννήτριας. Το κόστος αυτό αντιστοιχεί στο 10–15% του έργου. Οι κύριες επιμέρους εργασίες είναι οι εξής:

- Γεωτεχνική μελέτη, η οποία προαπαιτεί γεωλογικές μετρήσεις για να προσδιορισθεί η φέρουσα ικανότητα του εδάφους. Βραχώδη εδάφη θεωρούνται ιδανικά για την έδραση. Σε αντίθεση, μαλακά εδάφη συνεπάγονται βαθύτερες θεμελίωσεις ή ακόμη και χρήση πασσάλων, γεγονός που αυξάνει το κόστος κατασκευής.
- Οδοποιία πρόσβασης με ειδικές προδιαγραφές (πλάτος, κλίσεις, κλπ) για τις ορεινές περιοχές ή σε περιπτώσεις που είναι δύσκολη η πρόσβαση, προκειμένου να εξασφαλισθεί η ασφαλής μεταφορά των υλικών. Οι ειδικές προδιαγραφές περιλαμβάνουν:
 - ο Πλάτος δρόμου τουλάχιστον 5 – 6 μέτρα.
 - ο Κλίσεις μικρότερες από 10 – 12%.
 - ο Μεγάλες ακτίνες στροφής, ώστε τα πτερύγια, λόγω του μεγάλου μήκος τους, να μην βρίσκουν στα πρηνή.
 - ο Φέρουσα ικανότητα οδοστρώματος κατάλληλη για μεταφορά 12 – 15 τόνους.
- Χρήση γερανού για την τοποθέτηση της Α/Γ. Η εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας ισχύος άνω των 2 MW αποτελεί μια σύνθετη μηχανολογική επιχείρηση που απαιτεί τον απόλυτο συντονισμό δύο γερανών στο εργοτάξιο. Ο κύριος γερανός αναλαμβάνει τις βαριές ανυψώσεις σε ύψη πλήμνης 80 έως 100 μέτρων, μεταφέροντας τα τμήματα του πύργου (βάρους 40–60 τόνων το καθένα), το nacelle (70–80 τόνων) και τον πλήρη ρότορα. Παράλληλα, ο βοηθητικός γερανός εκτελεί τη ζωτική λειτουργία του "tailing", υποστηρίζοντας το κάτω μέρος των πυλώνων και των πτερυγίων κατά το ξεκόλλημά τους από το έδαφος, ώστε να έρθουν με ασφάλεια σε κατακόρυφη θέση. Η ενοικίαση ενός και μόνο γερανού αποκλείεται εξαιτίας του υψηλού δείκτη επικινδυνότητας· χωρίς τη διπλή υποστήριξη, τα πτερύγια κινδυνεύουν με δομική αστοχία λόγω κάμψης, ενώ περιορίζεται δραματικά και ο έλεγχος των ταλαντώσεων που προκαλεί ο άνεμος.
- Για την ασφαλή παραλαβή των υψηλών φορτίων που μεταφέρει ο εξοπλισμός αυτός στο έδαφος, κατασκευάζεται μια επίπεδη πλατεία ανέγερσης (crane pad) επιφάνειας 2.500–4.000 m². Η πλατεία σχεδιάζεται ώστε να αντέχει τη συνδυασμένη καταπόνηση και από τους δύο γερανούς, ενώ παραμένει ως μόνιμη κατασκευή στο εργοτάξιο για να εξυπηρετεί τις ανάγκες των μελλοντικών προγραμματισμένων ή έκτακτων συντηρήσεων του αιολικού πάρκου.
- Θεμελίωση. Για μια τυπική ανεμογεννήτρια έως 5 MW χρησιμοποιείται θεμελίωση βαρύτητας, με τεχνικά χαρακτηριστικά:

- ο Διάμετρο από 18 – 25 μέτρα.
- ο Βάθος 3 – 4 μέτρα.
- ο Σκυρόδεμα C30/37 ή ανώτερο τύπο όγκου 600 – 900 κυβικά μέτρα.
- ο Οπλισμός σκυροδέματος B500C βάρους 60 – 100 τόνους χάλυβα.

Στην θεμελίωση συμπεριλαμβάνεται και ο σύνδεσμος (bolt Cage) αποτελούμενος από κοχλίες υψηλής αντοχής, ο οποίος εγκιβωτίζεται στο μπετόν προκειμένου εκεί να βιδωθεί το πρώτο τμήμα του πυλώνα.

- Υποδομές δικτύου και κατασκευή κτιρίου Ελέγχου. Οι υποδομές αφορούν τα κανάλια για την υπόγεια διέλευση των καλωδίων μέσης τάσης που συνδέουν τις τουρμπίνες. Στο κτίριο ελέγχου στεγάζονται οι πίνακες ελέγχου, τα συστήματα τηλεμετρίας, οι βάσεις για τους μετασχηματιστές ισχύος του υποσταθμού για τη σύνδεση στο δίκτυο, καθώς και το προσωπικό.
- Τέλος, αφού ολοκληρωθούν τα κύρια έργα, γίνεται περιβαλλοντική αποκατάσταση, όπου πραγματοποιούνται:
 - ο Έργα αντιστήριξης πρανών για την αποφυγή κατολισθήσεων.
 - ο Αποστραγγιστικά έργα (τάφροι) για τα νερά της βροχής.
 - ο Αναδάσωση και αποκατάσταση του τοπίου γύρω από τις πλατείες ανέργειας.

3. Ηλεκτρολογικές υποδομές

Οι ηλεκτρολογικές υποδομές αποτελούν τη διασύνδεση του αιολικού πάρκου με το δίκτυο. Ο ρόλος τους είναι να συλλέξουν την ενέργεια που παράγεται από κάθε Α/Γ να την ανυψώσουν σε υψηλή τάση και να τη διοχετεύσουν με ασφάλεια στο Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΣΜΗΕ). Αντιπροσωπεύουν κατά προσέγγιση το 8 – 12% του συνολικού CAPEX. Η σωστή μελέτη τους, ως προς τη συνδεσμολογία, την καλωδίωση και την εγκατάσταση, είναι κρίσιμη για τον περιορισμό των ηλεκτρικών απωλειών, οι οποίες επηρεάζουν άμεσα τα έσοδα (OPEX). Η διαδικασία για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί:

- Μεταγωγή της τάσης από χαμηλή σε μέση τάση με μετασχηματιστή (Μ/Σ). Κάθε Α/Γ παράγει τάση της τάξεως των 690 V, η οποία πρέπει να μετασχηματιστεί σε Μέση Τάση (MT) της τάξεως των 20kV για να συνδεθεί με το δίκτυο χωρίς να υπάρξουν τεράστιες απώλειες. Ο Μ/Σ ισχύος τοποθετείται είτε μέσα στην άτρακτο είτε στη βάση του πυλώνα. Από την έξοδο του Μ/Σ συνδέονται καλώδια, από την πλευρά της MT και καταλήγουν μέσω υπόγειας όδευσης (βάθους περίπου ενός μέτρου) να συνδεθούν σε έναν ειδικό ηλεκτρολογικό πίνακα RMU (Ring Main

Unit). Το RMU είναι ένας compact, πλήρως στεγανός πίνακας μέσης τάσης (MV) που παίζει καθοριστικό ρόλο στη σύνδεση των ανεμογεννητριών με το εσωτερικό δίκτυο του πάρκου και, κατ' επέκταση, με τον Υποσταθμό Ανύψωσης (Υ/Σ). Τα καλώδια είναι τριφασικά, θωρακισμένα με XLPE κάλυψη και εγκιβωτίζονται σε άμμο για προστασία και απαγωγή θερμότητας. Ο RMU λειτουργεί ως ένας «έξυπνος» διακόπτης. Αν συμβεί μια βλάβη στην Α/Γ, ο RMU δίνει εντολή για την απομόνωσή της ηλεκτρικά, επιτρέποντας το υπόλοιπο πάρκο να συνεχίζει να δουλεύει κανονικά. Οι Α/Γ δεν συνδέονται η καθεμία ξεχωριστά με τον υποσταθμό αλλά συνδέονται σε σειρές (strings). Δηλαδή, αν υπάρχουν 5 – 8 ανεμογεννήτριες στη σειρά, τότε το υπόγειο καλώδιο θα συνδεθεί από την πρώτη, θα πάει στην δεύτερη και από εκεί θα συνεχίσει μέχρι έως ότου φτάσει στη τελευταία και το τελευταίο καλώδιο που καταλήγει στη RMU.

- Μεταγωγή της τάσης από μέση σε υψηλή τάση με Μ/Σ ισχύος. Ο Υποσταθμός είναι το σημείο όπου καταλήγουν όλα τα καλώδια μέσης τάσης του πάρκου. Αν το πάρκο είναι μεγάλο της τάξεως των 20 έως 30 MW, απαιτείται η κατασκευή ιδιόκτητου υποσταθμού. Εντός του υποσταθμού βρίσκονται ο κύριος Μ/Σ Ισχύος, όπου ανυψώνει την μέση τάση από τα 20 kV στην Υψηλή Τάση των 150 kV. Πριν συνδεθεί το αιολικό πάρκο στον Μ/Σ μεσολαβούν οι διακόπτες ισχύος (Δ/Ι) ΜΤ. Οι Δ/Ι ασφαλίζουν την γραμμή και επιτρέπουν την απομόνωση μιας σειράς ανεμογεννητριών σε περίπτωση βλάβης ή να βγει εκτός όλο το πάρκο. Η διασύνδεση του Δ/Ι ΜΤ με το Μ/Σ γίνεται μέσω ζυγών. Από το ζυγό καταλήγει στον Μ/Σ ισχύος και εκεί ανυψώνεται και συνδέεται με το δίκτυο Υψηλής Τάσης.
- Σύστημα παρακολούθησης. Είναι απαραίτητο να υπάρχει ένα σύστημα ελέγχου και τηλεπικοινωνιών SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) για να ελέγχεται η λειτουργία του πάρκου και όλου του Υποσταθμού. Το SCADA δίνει την δυνατότητα στον διαχειριστή να παρακολουθεί σε πραγματικό χρόνο την παραγωγή, τη θερμοκρασία των εξαρτημάτων, την ταχύτητα του ανέμου και να χειρίζεται το σύστημα εξ' αποστάσεως αν χρειαστεί. Το SCADA λαμβάνει δεδομένα από μετεωρολογικούς ιστούς που αφορούν την πυκνότητα και την κατεύθυνση του ανέμου, ώστε να βελτιστοποιεί τη γωνία των πτερυγίων (Pitch System) και τον προσανατολισμό (Yaw System).
- Αντιστάθμιση με χρήση συστοιχίας πυκνωτών. Η Α/Γ για να συνδεθεί στο δίκτυο πρέπει να παράγει σταθερή ενέργεια κρατώντας το δίκτυο σε αρμονική κατάσταση.

Ωστόσο, αυτό δεν είναι εφικτό διότι οι Α/Γ παράγουν μεταβαλλόμενη ενέργεια που έχει ως αποτέλεσμα να αλλοιώνει την λειτουργία και την αρμονία του δικτύου. Για την αποφυγή τέτοιων συμβάντων πρέπει να γίνεται αντιστάθμιση της άεργου ισχύος. Η αντιστάθμιση γίνεται με μία συστοιχία πυκνωτών, η οποία συνδέεται στον Κεντρικό Υποσταθμό πάνω στους ζυγούς της ΜΤ. Οι πυκνωτές βοηθούν στην λειτουργία του πάρκου, όταν αυτό δουλεύει στην μέγιστη ισχύ του διατηρώντας σταθερή την τάση στο δίκτυο και περιορίζουν τα επαγωγικά στοιχεία που εμφανίζει η Α/Γ. Ακόμη, στα πολύ σύγχρονα αιολικά συστήματα οι συστοιχίες των πυκνωτών αντικαθίστανται ή συμπληρώνονται με συστήματα STATCOM (Static Synchronous Compensators). Το σύστημα αυτό διαφέρει σε σχέση με τον πυκνωτή γιατί ενώ οι πυκνωτές προσφέρουν στιγμιαία αντιστάθμιση το STATCOM χρησιμοποιεί ηλεκτρονικά ισχύος για να προσφέρει ακαριαία και συνεχή ρύθμιση, κάτι που απαιτείται για τη σταθερότητα του δικτύου όταν ο άνεμος μεταβάλλεται απότομα.

- Γραμμή μεταφοράς. Είναι η γραμμή υψηλής τάσης που ξεκινά από τον υποσταθμό του πάρκου και καταλήγει στο πλησιέστερο σημείο διασύνδεσης του ΑΔΜΗΕ. Το κόστος της γραμμής εξαρτάται από τη χιλιομετρική απόσταση που μπορεί να βρίσκεται το σημείο σύνδεσης.
- Προστασία του πάρκου. Κάθε αιολικό πάρκο αποτελείται από ένα συγκεκριμένο πλήθος ανεμογεννητριών οι οποίες είναι εκτεθειμένες σε καιρικές συνθήκες. Η χειρότερη περίπτωση, που είναι και το πιο πιθανόν σενάριο, είναι ο κεραυνός. Λόγω του ύψους τους και της μεταλλικής τους κατασκευής, οι Α/Γ έλκουν κεραυνούς. Η επαφή τους μπορεί να προκαλέσει καταστροφή της Α/Γ και αργότερα να σημάνει κίνδυνο πυρκαγιάς ή δυσλειτουργία στο πάρκο. Για αυτό θα πρέπει να υπάρχει ουσιώδης αντικεραυνική προστασία και οι κατάλληλες γειώσεις. Το σύστημα γειώσεων αποτελεί το κρίσιμο στάδιο για το πάρκο και λειτουργεί ως εξής: Κάθε θεμέλιο περιλαμβάνει ένα εκτεταμένο δίκτυο γείωσης, που αποτελείται από χάλκινους αγωγούς και ηλεκτρόδια) για να διοχετεύει το ρεύμα του κεραυνού με ασφάλεια στο έδαφος. Ακολουθεί η αντικεραυνική προστασία, η οποία κατευθύνει το ρεύμα του κεραυνού στο έδαφος. Η τοποθέτησή της δεν είναι μόνο σε ένα σημείο, αλλά είναι ένα ιεραρχημένο σύστημα που καλύπτει όλη την Α/Γ από την κορυφή των πτερυγίων μέχρι να φτάσει στο έδαφος. Οι προστασίες τοποθετούνται:
 - ο Στις άκρες των πτερυγίων, προστατεύοντας τα σύνθετα υλικά του (υαλόπλεγμα/ανθρακόνημα) από την τήξη τους.

- ο Στην άτρακτο και στην πλήμνη, όπου εκεί χρησιμοποιούνται ειδικές ψήκτρες άνθρακα ή δακτύλιοι ολίσθησης που «γεφυρώνουν» ηλεκτρικά την πλήμνη με την άτρακτο και την άτρακτο με τον πυλώνα. Αυτό επιτρέπει στο ρεύμα του κεραυνού να «πηδήξει» πάνω από τα ρουλεμάν, τα οποία αν δέχονταν τέτοιο φορτίο θα έλιωναν ακαριαία. Επιπλέον, σε ορισμένα σημεία τοποθετούνται διάκενα σπινθηρισμού που επιτρέπουν στο ρεύμα να εκτονωθεί προς το σκελετό της μηχανής αν η τάση ξεπεράσει ένα όριο.
- ο Στον πυλώνα
- ο Στους ηλεκτρονικούς πίνακες και στον μετασχηματιστή, όπου εγκαθίστανται απαγωγοί υπέρτασης. Ο σκοπός τους είναι μην επιτρέπουν απότομες αυξήσεις τάσης που προκαλούνται από κοντινούς κεραυνούς, προστατεύοντας τα ηλεκτρονικά ισχύος και το σύστημα SCADA.

4. Λοιπά Έξοδα

Στα λοιπά έξοδα, τα οποία αποτελούν το 5 – 10% του CAPEX, περιλαμβάνονται:

- Το Κόστος Ανάπτυξης και Αδειοδότησης θεωρείται το γραφειοκρατικό κόστος και το κόστος μελετών. Η διαδικασία αυτή στην Ελλάδα μπορεί να διαρκέσει 5 – 8 έτη. Εδώ συμπεριλαμβάνονται:
 - ο Οι περιβαλλοντικές μελέτες (ΕΠΟ) που σχετίζονται με την μελέτη της πανίδας, της χλωρίδας και του θορύβου.
 - ο Οι άδειες για παραγωγή και σύνδεση, στις οποίες περιλαμβάνονται τα αντίστοιχα παράβολα προς την ΡΑΕ (Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας), τους διαχειριστές δικτύου (ΔΕΔΔΗΕ, ΑΔΜΗΕ) και τις αρχαιολογικές και δασικές υπηρεσίες για αυτοψία και έγκριση.
- Τα νομικά έξοδα, οι αμοιβές χρηματοοικονομικών συμβούλων και ανεξάρτητου μηχανικού. Τα νομικά έξοδα θεωρούνται η σύνταξη συμβολαίων με τους κατασκευαστές, συμφωνητικά για την ιδιοκτησία γης και ο σχετικός νομικός έλεγχος αυτών. Οι χρηματοοικονομικοί σύμβουλοι σχετίζονται με τη δόμηση του εκάστοτε δανεισμού. Ο ανεξάρτητος μηχανικός επιβλέπει τον κατασκευαστή για λογαριασμό του επενδυτή, διασφαλίζοντας ότι όλα πραγματοποιούνται βάσει προδιαγραφών.
- Τα χρηματοοικονομικά έξοδα κατασκευής, τα οποία είναι τα κόστη που θα εμφανιστούν κατά την πορεία του έργου, όπως οι τόκοι των δανείων πριν το πάρκο αρχίσει να παράγει ρεύμα και έσοδα. Σε αυτά περιλαμβάνεται επίσης η προμήθεια

της τράπεζας για την οργάνωση της χρηματοδότησης και οι εγγυητικές επιστολές, δηλαδή τα ποσά που δεσμεύονται υπέρ του κράτους ή του διαχειριστή ως εγγύηση ότι το έργο θα ολοκληρωθεί.

- Η ασφάλιση, η οποία αφορά κάλυψη για τη μεταφορά των εξαρτημάτων, προστασία έναντι πυρκαγιάς, πλημμύρας, κλοπής και εργασιακών ατυχημάτων κατά τη διάρκεια του έργου.
- Το κόστος απρόβλεπτων συμβάντων.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα κόστη γίνεται αντιληπτό ότι το συνολικό κόστος κατασκευής ενός αιολικού πάρκου είναι πολύ υψηλό.

5.2.3 Το Κόστος Κατασκευής CAPEX στην Ελλάδα

Η ανάλυση της Ελληνικής πραγματικότητας στον τομέα των αιολικών πάρκων για το έτος 2025-2026 αποκαλύπτει μια μοναδική «εξίσωση» κόστους. Ενώ η τεχνολογία παγκοσμίως τείνει να γίνεται φθηνότερη, η Ελλάδα παρουσιάζει μια ιδιομορφία που αποδίδεται στο γεωγραφικό και τοπογραφικό ανάγλυφο της χώρας.

Σε αντίθεση με τις επίπεδες εκτάσεις της Βόρειας Ευρώπης (π.χ. Γερμανία, Δανία), η Ελλάδα εγκαθιστά το μεγαλύτερο μέρος των αιολικών της πάρκων σε κορυφογραμμές. Αυτό μεταβάλλει δραματικά τη δομή του CAPEX:

- Στην κατασκευή δρόμων σε μεγάλα υψόμετρα με κλίσεις που πρέπει να επιτρέπουν τη διέλευση οχημάτων 100+ τόνων απαιτεί εκτεταμένες εκσκαφές και έργα αντιστήριξης. Το κόστος αυτό στην Ελλάδα αντιπροσωπεύει συχνά το 18-22% των έργων Πολιτικού Μηχανικού, έναντι 8-10% στην υπόλοιπη Ευρώπη.
- Λόγω των στενών στροφών στους ορεινούς δρόμους, χρησιμοποιούνται πλέον «ανυψωτές πτερυγίων» (blade lifters). Πρόκειται για ειδικά οχήματα που σηκώνουν το πτερύγιο σχεδόν κάθετα για να χωρέσει στις στροφές. Η ενοικίαση αυτού του εξοπλισμού προσθέτει ένα σημαντικό κατ' αποκοπή ποσό στο κόστος μεταφοράς.
- Ένα από τα μεγαλύτερα κόστη για έναν επενδυτή στην Ελλάδα το 2025 είναι η απόσταση από το σημείο σύνδεσης του ΑΔΜΗΕ. Πολλά πάρκα αναπτύσσονται σε απομακρυσμένες περιοχές όπου το δίκτυο είναι ασθενές. Ο επενδυτής υποχρεούται συχνά να κατασκευάσει ο ίδιος υποσταθμούς υψηλής τάσης (150kV) και γραμμές μεταφοράς δεκάδων χιλιομέτρων.
- Παρά τις προσπάθειες απλοποίησης, ο χρόνος αδειοδότησης στην Ελλάδα παραμένει υψηλός (~7 έτη). Επειδή ένα έργο δεσμεύει κεφάλαια για πολλά χρόνια

πριν καν ξεκινήσει η κατασκευή, οι τόκοι συσσωρεύονται. Στο Ελληνικό περιβάλλον του 2025, το κόστος κεφαλαίου επηρεάζει το συνολικό προϋπολογισμό κατά περίπου 6-8%.

Σύμφωνα με τις στατιστικές της ΕΛΕΤΑΕΝ το 2025 στην Ελλάδα συνδέθηκαν νέα πάρκα συνολικής ισχύος 340 MW, με τις επενδύσεις να φτάνουν σε ύψος στα 420 εκατομμύρια ευρώ. Παρόλο που το μέσο κόστος ανά MW φαίνεται υψηλό κατά 1,23 εκατομμύρια δεν αποτελεί ένδειξη αναποτελεσματικότητας, αλλά αντικατοπτρίζει τη δυσκολία του εδάφους και την ποιότητα των έργων. Η Ελληνική αγορά έχει ωριμάσει και μελλοντικά αναμένεται περαιτέρω εξορθολογισμός του κόστους, μέσω χρήσης τεχνητής νοημοσύνης για το σχεδιασμό των πάρκων.

5.3 Κόστος συντήρησης & λειτουργίας αιολικού πάρκου

Το κόστος συντήρησης & λειτουργίας (OPEX) αναλύεται σε δύο κύριες συνιστώσες:

1. Σταθερό OPEX

Περιλαμβάνει δαπάνες με χαμηλή μεταβλητότητα, όπως:

- Το ενοίκιο της γης, το οποίο συνήθως υπολογίζεται ως $C_L = k \cdot P_{rev}$, όπου το C_L είναι το ετήσιο κόστος μίσθωσης που καταβάλλει ο επενδυτής στον ιδιοκτήτη της γης. Στις χρηματοοικονομικές ροές (Cash Flows), καταγράφεται ως σταθερό στοιχείο του λειτουργικού κόστους, παρόλο που το ποσό μεταβάλλεται, επειδή η υποχρέωση καταβολής είναι πάγια. Ο συντελεστής k είναι ο σταθερός συντελεστής (σε μορφή ποσοστού) που συμφωνείται στη σύμβαση. Στην ελεύθερη αγορά κυμαίνεται μεταξύ από 3% έως 6%. Στην Ελλάδα, για τις δημόσιες εκτάσεις, ο συντελεστής k είναι νομοθετικά ορισμένος στο 3%. Το P_{rev} (Gross Revenue) είναι τα ακαθάριστα έσοδα του πάρκου. Υπολογίζεται ως το γινόμενο της παραγόμενης ενέργειας (E) επί την τιμή πώλησης (P). Ο μαθηματικός τύπος είναι:

$$P_{rev} = \sum_{i=1}^{8760} (E_i \cdot P_i) \text{ , με το 8760 να είναι οι ώρες του έτους}$$

- Κόστη διασύνδεσης και διαχείρισης που ακολουθούν προκαθορισμένους κανόνες των ρυθμιστικών αρχών.

2. Μεταβλητό OPEX

Εδώ περιλαμβάνεται το κόστος Λειτουργίας και Συντήρησης. Συνήθως, το κόστος συντήρησης θεωρείται ανάλογο του ρυθμού Αστοχίας (Failure Rate - λ), ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Όπου, $f(t)$ είναι η πυκνότητα πιθανότητας αστοχίας η ο οποία θεωρείται ότι ακολουθεί κατανομή Weibull και $R(t)$ η συνάρτηση αξιοπιστίας.

5.3.1 Μηχανική της Αξιοπιστίας και Κατανομή Weibull

Η διαχείριση του μεταβλητού OPEX (O&M) βασίζεται στη θεωρία της Μηχανικής της Αξιοπιστίας. Ο ρυθμός αστοχίας $\lambda(t)$ των υποσυστημάτων μιας ανεμογεννήτριας (κιβώτιο ταχυτήτων, γεννήτρια, πτερύγια) μοντελοποιείται συχνά μέσω της κατανομής Weibull (Κεφ. 2.4.4):

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

Η στρατηγική απόσβεσης του OPEX στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της παραμέτρου k μέσω Προγνωστικής Συντήρησης (Predictive Maintenance), αποτρέποντας τη μετάβαση στην εκθετική φάση της καμπύλης Bathtub (Εικ. 5.5).

Η Καμπύλη Bathtub αποτελεί το θεμελιώδες πρότυπο στη Μηχανική της Αξιοπιστίας (Reliability Engineering) για την περιγραφή του ρυθμού αποτυχίας ενός σύνθετου τεχνικού συστήματος, όπως η ανεμογεννήτρια, κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Η καμπύλη αναπαριστά τη Συνάρτηση Διακινδύνευσης (Εικ. 5.6) (Hazard Function), $h(t)$, και χωρίζεται σε τρεις διακριτές χρονικές περιόδους, καθεμία από τις οποίες έχει διαφορετική επίδραση στο μεταβλητό OPEX.

- Φάση Πρώιμων Αστοχιών (Infant Mortality Period)

Αυτή είναι η περίοδος "burn-in" ή "debugging". Ο ρυθμός αποτυχίας $\lambda(t)$ ξεκινά από πολύ υψηλή τιμή και μειώνεται σταδιακά καθώς διορθώνονται τα προβλήματα.

Αυτό οφείλεται στα κατασκευαστικά ελαττώματα, ουσιαστικά είναι σφάλματα κατά τη συναρμολόγηση/εγκατάσταση στο πεδίο (commissioning) ή αστοχίες υλικών που δεν εντοπίστηκαν στον ποιοτικό έλεγχο. Παρόλο που ο ρυθμός βλαβών είναι υψηλός, το οικονομικό βάρος για τον επενδυτή είναι συνήθως χαμηλό, καθώς καλύπτεται από τις εγγυήσεις του κατασκευαστή (OEM Warranty).

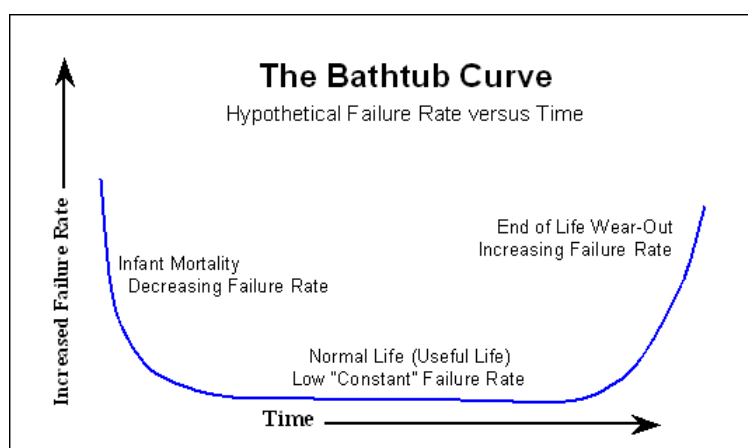
- Φάση Χρήσιμης Ζωής (Useful Life / Constant Failure Rate)

Εδώ ο ρυθμός αποτυχίας είναι σχεδόν σταθερός και στο χαμηλότερο δυνατό σημείο. Οι βλάβες σε αυτή τη φάση θεωρούνται «τυχαίες» ή στοχαστικές. Αυτή η φάση περιγράφεται από την Εκθετική Κατανομή, όπου οι αστοχίες ακολουθούν μια

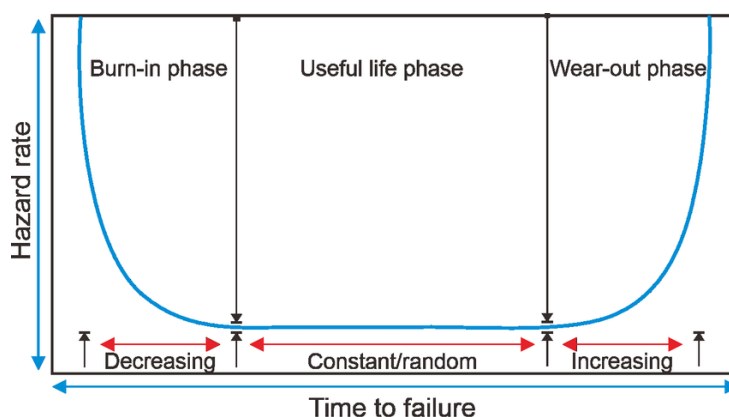
διαδικασία Poisson. Είναι η χρυσή περίοδος της επένδυσης (συνήθως έτη 3 έως 15). Το μεταβλητό OPEX είναι προβλέψιμο και αφορά κυρίως την Προληπτική Συντήρηση (Preventive Maintenance).

- Φάση Γήρανσης (Wear-out Period)

Μετά από 15-20 έτη λειτουργίας, ο ρυθμός αποτυχίας αρχίζει να αυξάνεται εκθετικά. Εμφανίζονται μηχανική κόπωση (fatigue), διάβρωση, υποβάθμιση μονώσεων και φθορά των κινούμενων μερών. Σε αυτό το σημείο χρησιμοποιείται η Κατανομή Weibull με την παράμετρο $\beta > 1$, που υποδηλώνει ότι το σύστημα «γερνάει». Το κόστος εκτοξεύεται. Εδώ λαμβάνονται οι κρίσιμες αποφάσεις: αν θα συνεχιστεί η λειτουργία με υψηλό κόστος επισκευών ή αν το πάρκο θα οδηγηθεί σε Repowering (ολική αντικατάσταση).



Εικόνα 5.5: Καμπύλη Bathtub



Εικόνα 5.6: Συνάρτηση Διακινδύνευσης

5.3.2 Συνάρτηση αξιοπιστίας $R(t)$

Η συνάρτηση αξιοπιστίας (reliability function), η οποία συμβολίζεται ως $R(t)$, ορίζεται ως η πιθανότητα ένα σύστημα —ή ένα συγκεκριμένο υποσύστημά του— να λειτουργεί χωρίς βλάβη για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα t , υπό καθορισμένες συνθήκες

λειτουργίας. Στο πλαίσιο της τεχνοοικονομικής ανάλυσης, η συνάρτηση αξιοπιστίας αποτελεί το βασικό εργαλείο για την πρόβλεψη, τη μοντελοποίηση και τη βελτιστοποίηση των λειτουργικών δαπανών.

Σε αντίθεση με το σταθερό OPEX (βλ. Κεφάλαιο 5.3), το μεταβλητό OPEX συναρτάται άμεσα με τη χρήση, τον βαθμό φθοράς και τις αστοχίες του εξοπλισμού. Η συνάρτηση αξιοπιστίας συνδέεται οργανικά με το μεταβλητό OPEX μέσω των ακόλουθων τριών μηχανισμών:

1. Ρυθμός Αστοχίας ($\lambda(t)$): Η αξιοπιστία συνδέεται μαθηματικά με τον ρυθμό αστοχίας του εξοπλισμού. Μια ταχεία μείωση της αξιοπιστίας $R(t)$ συνεπάγεται την αντίστοιχη αύξηση του ρυθμού αστοχιών $\lambda(t)$ ανά μονάδα χρόνου, γεγονός που προμηνύει αυξημένες ανάγκες για τεχνικές παρεμβάσεις.
2. Κόστος Διορθωτικής Συντήρησης (Corrective Maintenance Cost): Κάθε φορά που το σύστημα αστοχεί —γεγονός που εκφράζεται μαθηματικά από την πιθανότητα αναξιόπιστης λειτουργίας $1 - R(t)$ — απαιτείται η εκτέλεση έκτακτης (διορθωτικής) συντήρησης. Η εξέλιξη αυτή συνεπάγεται άμεσο μεταβλητό κόστος, το οποίο περιλαμβάνει την αγορά ανταλλακτικών, το κόστος των εργατοωρών, τα μεταφορικά έξοδα, καθώς και την απώλεια εσόδων λόγω του νεκρού χρόνου λειτουργίας (downtime).
3. Στρατηγική Προληπτικής Συντήρησης (Preventive Maintenance Strategy): Με σκοπό τη διατήρηση της $R(t)$ σε υψηλά, αποδεκτά επίπεδα και την αποφυγή αιφνίδιων βλαβών, προγραμματίζονται περιοδικές συντηρήσεις. Το κόστος αυτών των προγραμματισμένων επεμβάσεων ενσωματώνεται επίσης στο μεταβλητό OPEX, λειτουργώντας όμως ως μια «επένδυση» που εξασφαλίζει την παράταση της εύρυθμης λειτουργίας του εξοπλισμού μελλοντικά.

Η ενσωμάτωση της $R(t)$ στην οικονομική αξιολόγηση είναι καθοριστική για τη βελτιστοποίηση του κόστους συντήρησης, τόσο σε βραχυπρόθεσμο όσο και σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα. Σε βραχυπρόθεσμο επίπεδο, η συνάρτηση αξιοπιστίας επιτρέπει την εξισορρόπηση μεταξύ προληπτικής και διορθωτικής συντήρησης (trade-off analysis). Για παράδειγμα, μια υποτιμημένη δαπάνη για προληπτικές ενέργειες ενδέχεται να παρουσιάσει αρχικά ένα τεχνητά χαμηλό OPEX, ωστόσο μαθηματικά οδηγεί σε ραγδαία πτώση της αξιοπιστίας $R(t)$. Η εξέλιξη αυτή προκαλεί αλυσιδωτές, συχνές βλάβες, με αποτέλεσμα την κατακόρυφη αύξηση του μεταβλητού OPEX λόγω των αναγκαίων έκτακτων διορθωτικών παρεμβάσεων. Μέσω της συνάρτησης αξιοπιστίας καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός της βέλτιστης οικονομικά «χρυσής

τομής», στην οποία ελαχιστοποιείται το άθροισμα του κόστους πρόληψης και αποκατάστασης.

Σε μακροπρόθεσμο επίπεδο και στο πλαίσιο πολυετών οικονομικών αναλύσεων (π.χ. σε ορίζοντα 20ετίας), η $R(t)$ εισάγεται ως θεμελιώδης παράμετρος σε στοχαστικά μοντέλα. Η μεθοδολογία αυτή επιτρέπει την πρόβλεψη —με υψηλό βαθμό στατιστικής ακρίβειας— του χρονικού σημείου κατά το οποίο θα απαιτηθούν κεφαλαιουχικές δαπάνες μεγάλης κλίμακας, όπως η ολοκληρωτική αντικατάσταση κύριων εξαρτημάτων (overhaul). Συνεπώς, η δυναμική αποτύπωση της αξιοπιστίας στον χρόνο προσφέρει μια σαφή εικόνα για τη διακύμανση των ταμειακών ροών (cash flow) του έργου, θωρακίζοντας την επένδυση έναντι απρόβλεπτων λειτουργικών κινδύνων.

5.3.3 Στρατηγικές Συντήρησης

Η επιστήμη της συντήρησης στα αιολικά πάρκα έχει εξελιχθεί σε τρία επίπεδα, τα οποία είναι:

1. Διορθωτική (Corrective Maintenance) είναι το στάδιο επισκευής μετά την αστοχία. Σε σύγκριση με τις άλλες δύο είναι η ακριβότερη στρατηγική λόγω του κόστους ευκαιρίας, δηλαδή το κόστος διαφυγόντων εσόδων από την παύση λειτουργίας. Εφαρμόζεται σε εξαρτήματα χαμηλού κόστους και χαμηλής κρισιμότητας, όπου το κόστος παρακολούθησης υπερβαίνει το κόστος αντικατάστασης.
2. Προληπτική (Preventive Maintenance) είναι η περιοδική συντήρηση βάσει χρόνου. Βασίζεται στις στατιστικές οδηγίες του κατασκευαστή και στην ιστορική μέση διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων. Ωστόσο, μειώνει τον ρυθμό αστοχίας αλλά συχνά οδηγεί σε σπατάλη πόρων όπως αντικατάσταση εξαρτημάτων που μπορεί να είναι λειτουργικά ακόμα.
3. Προγνωστική (Predictive Maintenance) αποτελεί την αιχμή του δόρατος για το 2026. Βασίζεται στη συνεχή παρακολούθηση της κατάστασης και τη χρήση αλγόριθμων για τη πρόβλεψη της αστοχίας. Τέτοια είδους εργαλεία είναι:
 - ο Η ανάλυση κραδασμών όπου χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός Fourier για τον εντοπισμό συχνοτήτων που υποδηλώνουν φθορά σε ρουλεμάν ή γρανάζια.
 - ο Σύστημα αισθητήρων που μετράει τα μεταλλικά σωματίδια στο λιπαντικό.
 - ο Σύστημα ανίχνευσης υπερήχων για το εντοπισμό μικρο-ρωγμών στα πτερύγια.
 - ο Υπολογισμός του RUL (Remaining Useful Life) με μαθηματικό μοντέλο, ώστε η συντήρηση να προγραμματίζεται ακριβώς πριν την εκτιμώμενη στιγμή της αστοχίας.

4. Στρατηγική – Προληπτική (Reliability – Centered Maintenance - RCM) η συγκεκριμένη βασίζεται σε μία φιλοσοφία Asset Management. Χρησιμοποιεί την ανάλυση FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) για να ιεραρχήσει τις ενέργειες. Ουσιαστικά αναλύει όλη τη διαδικασία της λειτουργίας του υποσυστήματος, τους τρόπους που μπορεί να αποτύχει το συγκεκριμένο σύστημα και τα αποτελέσματα που μπορεί να επιφέρει. Για αυτό έχει ως στόχο τη βελτιστοποίηση των πόρων. Για παράδειγμα, αν μια βλάβη στον αισθητήρα ανέμου (ανεμόμετρο) σταματά όλη την τουρμπίνα, η RCM επιβάλλει την ύπαρξη διπλού (redundant) συστήματος ή αυστηρότερης προγνωστικής παρακολούθησης.

5.3.4 Ψηφιοποίηση και Δυναμική Διαχείριση Εντροπίας

Η εντροπία του συστήματος παρακολουθείται σε πραγματικό χρόνο με χρήση Big Data Analytics, όπου γίνεται η ανάλυση χρονοσειρών που επιτρέπει τον εντοπισμό ανωμαλιών πριν την εκδήλωση καταστροφικής αστοχίας. Με την Opportunity O&M ή Opportunistic Maintenance μια εργασία συντήρησης εκτελείται όταν παρουσιάζεται μια ευκαιρία που μπορεί να ελαχιστοποιήσει το κόστος ή την απώλεια παραγωγής του εκάστοτε έργου. Αυτό στοχεύει στη μείωση του κόστους ευκαιρίας (Opportunity Cost), μιας και μια εργασία προγραμματίζεται να εκτελεστεί ώστε να μην χρειαστεί να σταματήσει ένα πλήθος Α/Γ στην περίοδο παραγωγής του, αλλά στο χρονικό διάστημα που δεν παράγουν μεγάλη ισχύ ή βρίσκονται σε άπνοια.

Επιπλέον, ακολουθείται η μεθοδολογία της ομαδοποίησης των εργασιών. Για παράδειγμα, εάν μια τουρμπίνα σταματά αναγκαστικά για μία βλάβη πέραν της αποκατάστασης της βλάβης υλοποιούνται ταυτόχρονα και άλλες προγραμματισμένες εργασίες που θα υλοποιούνταν σε σύντομο χρονικό διάστημα, αποφεύγοντας το επιπλέον κόστος μετακίνησης προσωπικού, γερανών και εξοπλισμού.

Ορισμένες φορές, ο Διαχειριστής του δικτύου δίνει εντολή στο πάρκο να μειώσει την παραγωγή επειδή υπάρχει υπερφόρτιση στο δίκτυο. Εφόσον η ενέργεια είναι περιττή για το δίκτυο, χρησιμοποιείται αυτός αναγκαστικά μη παραγωγικός ο χρόνος για να γίνουν συντηρήσεις στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό ή στον καθαρισμό των μετασχηματιστών.

5.3.5 Η Ελληνική Ιδιαιτερότητα στο OPEX

Στην Ελλάδα, το OPEX επηρεάζεται από παράγοντες που δεν υπάρχουν στη Βόρεια Ευρώπη αλλά εμφανίζουν μία ποσοτική απόκλιση. Αυτοί οι παράγοντες που διαφοροποιούν το λειτουργικό κόστος είναι:

- Γεωμορφολογία και Logistics Συντήρησης (The Alpine Challenge)

Στην Ελλάδα, το 80% των αιολικών πάρκων βρίσκεται σε υψόμετρο άνω των 800-1.000 μέτρων. Αυτό επηρεάζει το μεταβλητό OPEX μέσω του δείκτη MTTR (Mean Time To Repair). Οι δρόμοι πρόσβασης σε κορυφογραμμές υπόκεινται σε έντονη διάβρωση από τον παγετό και τις κατολισθήσεις. Το OPEX περιλαμβάνει συνεχή έξοδα «Πολιτικού Μηχανικού Συντήρησης» (καθαρισμός δρόμων, αποκατάσταση πρανών), τα οποία σε επίπεδα εδάφη είναι σχεδόν μηδενικά. Η μίσθωση ενός γερανού μεγάλης ανυψωτικής ικανότητας στην Ελλάδα είναι ακριβότερη λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας και της δυσκολίας μεταφοράς του σε ορεινούς δρόμους με στενές στροφές. Το κόστος «μεταφοράς και στησίματος» (Mobilization/Demobilization) μπορεί να καταναλώσει το 20-30% του προϋπολογισμού μιας επισκευής.

- Κλιματική Καταπόνηση από Αλατότητα και Κεραυνοί

Η Ελλάδα συνδυάζει δύο ακραίους παράγοντες που επιταχύνουν την Εντροπία των υλικών: Salt Mist Corrosion (Διάβρωση από Αλάτι): Λόγω του έντονου διαμελισμού των ακτών, η αερομεταφερόμενη αλατότητα φτάνει ακόμα και σε πάρκα που θεωρούνται «ηπειρωτικά». Αυτό οδηγεί σε ταχύτερη υποβάθμιση των προστατευτικών βαφών. Το OPEX αυξάνεται λόγω της ανάγκης για συχνότερες επιθεωρήσεις και τοπικές αποκαταστάσεις (touch-ups) στον πύργο και την άτρακτο. Ακόμη, οι ελληνικές κορυφογραμμές παρουσιάζουν υψηλή κεραυνική δραστηριότητα. Αυτό σημαίνει συχνότερες ενεργοποιήσεις των SPD (Surge Protective Devices) και φθορές στους υποδοχείς των περυγίων (receptors). Η αντικατάσταση αυτών των αναλώσιμων και ο έλεγχος της συνέχειας της γείωσης μετά από κάθε καταιγίδα είναι ένα «σταθερό-μεταβλητό» έξοδο για τα ελληνικά πάρκα.

- Το Νομοθετικό «Ενοίκιο» (The 3% Social Levy)

Όπως αναλύθηκε από τον τύπο της μίσθωσης γης η Ελλάδα έχει μια μοναδική δομή σταθερού OPEX. Ενώ στο εξωτερικό το Land Lease είναι συχνά ένα διαπραγματεύσιμο ποσό ανά τουρμπίνα, στην Ελλάδα το 3% των ακαθάριστων εσόδων είναι μια υποχρεωτική «κοινωνική εισφορά». Αυτό το 3% λειτουργεί ως φόρος επί του κύκλου εργασιών, γεγονός που σημαίνει ότι ακόμα και αν το πάρκο έχει υψηλά λειτουργικά έξοδα, το «ενοίκιο» παραμένει υψηλό όσο παράγεται ενέργεια.

- Διαχείριση Δικτύου και Curtailment (Περικοπές)

Η παραγόμενη ενέργεια προς το Ελληνικό δίκτυο σε ορισμένες περιοχές (π.χ. Εύβοια, Θράκη) οδηγεί σε συχνές εντολές περικοπής παραγωγής από τον ΑΔΜΗΕ για λόγους υπερφόρτισης του δικτύου. Οι περικοπές αυτές αποτελούν ένα «έμμεσο λειτουργικό κόστος». Επιστημονικά, αυτό αυξάνει το LCOE, καθώς τα σταθερά έξοδα (ασφάλιση, μισθοδοσία, φύλαξη) επιμερίζονται σε λιγότερες παραγόμενες Μεγαβατώρες (MWh). Η διαχείριση αυτών των περικοπών απαιτεί πιο εξελιγμένα συστήματα SCADA και Energy Management, αυξάνοντας το κόστος του εξειδικευμένου προσωπικού.

5.4 Μεσοσταθμικό Κόστος Κεφαλαίου (WACC)

Ο όρος **WACC (Weighted Average Cost of Capital)** ή **Μεσοσταθμικό Κόστος Κεφαλαίου** ή **ελάχιστος αποδεκτός εσωτερικός ρυθμός απόδοσης MARR (Minimum Acceptable Rate of Return)** αποτελεί τον κρισιμότερο ίσως δείκτη για την αξιολόγηση μιας επένδυσης σε αιολικά πάρκα. Ουσιαστικά, αντιπροσωπεύει την ελάχιστη απόδοση που πρέπει να έχει το έργο για να ικανοποιήσει τους χρηματοδότες του (τράπεζες) και τους μετόχους του.

Στον τομέα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), το WACC είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο, καθώς τα αιολικά πάρκα είναι εντάσεως κεφαλαίου (**CAPEX-intensive**) δηλαδή, το μεγαλύτερο μέρος των εξόδων γίνεται " εμπροσθοβαρώς" για την κατασκευή, ενώ τα λειτουργικά έξοδα είναι συγκριτικά μεταγενέστερους χρόνους.

5.4.1 Μαθηματικό Μοντέλο υπολογισμού του Μεσοσταθμικού Κόστους Κεφαλαίου

Το WACC υπολογίζεται συνδυάζοντας το κόστος του δανεισμού και το κόστος των ιδίων κεφαλαίων, ανάλογα με τη συμμετοχή τους στη χρηματοδότηση:

$$WACC = \left(\frac{E}{V} \cdot R_e \right) + \left(\frac{D}{V} \cdot R_d \cdot (1 - T_c) \right)$$

Όπου:

- E : Ίδια Κεφάλαια (Equity)
- D : Δανειακά Κεφάλαια (Debt)
- V : Συνολική Αξία ($E + D$)
- R_d : Κόστος Δανεισμού (επιτόκιο τραπεζών)
- T_c : Συντελεστής Εταιρικού Φόρου (το κόστος του χρέους μειώνεται λόγω φοροαπαλλαγής των τόκων)

- R_e : Κόστος Ιδίων Κεφαλαίων (η απόδοση που ζητούν οι μέτοχοι), το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$R_e = R_f + \beta \cdot (R_m - R_f)$$

όπου:

- R_f (Risk-free Rate): Η απόδοση των κρατικών ομολόγων (π.χ. 10ετές Γερμανικό, Ελληνικό, κλπ).
- β (Beta): Ο δείκτης μεταβλητότητας του κλάδου των αιολικών σε σχέση με την αγορά.
- $R_m - R_f$ (Equity Risk Premium): Η επιπλέον απόδοση που ζητούν οι επενδυτές για να ρισκάρουν σε μετοχές αντί για ομόλογα.

5.4.2 Παράγοντες που επηρεάζουν το Μεσοσταθμικό Κόστος Κεφαλαίου στα αιολικά πάρκα

Η ιδιαιτερότητα των αιολικών έγκειται στο πώς οι επενδυτές αντιλαμβάνονται το ρίσκο:

- **Συμβάσεις Πώλησης Ενέργειας (PPA):** Ένα πάρκο με εγγυημένη τιμή πώλησης (Feed-in Premium ή PPA με σταθερή τιμή) έχει χαμηλότερο ρίσκο, άρα χαμηλότερο WACC. Αν η ενέργεια πωλείται απευθείας στην αγορά (merchant risk), το WACC ανεβαίνει.
- **Τεχνολογικό Ρίσκο:** Τα χερσαία αιολικά (onshore) θεωρούνται ώριμη τεχνολογία και έχουν χαμηλότερο WACC σε σχέση με τα υπεράκτια (offshore), τα οποία έχουν μεγαλύτερες κατασκευαστικές προκλήσεις.
- **Τοποθεσία & Αιολικό Δυναμικό:** Η αβεβαιότητα για το πόσο θα φυσάει (wind yield uncertainty) επηρεάζει την ικανότητα αποπληρωμής του χρέους.
- **Μόχλευση (Gearing):** Στα αιολικά πάρκα, η αναλογία χρέους προς ίδια κεφάλαια είναι συνήθως υψηλή (π.χ. 70/30 ή 80/20), γεγονός που βοηθά στη μείωση του συνολικού WACC, αρκεί τα επιτόκια να παραμένουν χαμηλά.

Οι μεταβολές στο WACC παρουσιάζει μεταβολές στο κόστος παραγωγής του έργου (LCOE). Σε ένα αιολικό έργο, το 70-80% του συνολικού κόστους ζωής του καθορίζεται από τη χρηματοδότηση. Αν το WACC αυξηθεί κατά 2%, το LCOE μπορεί να αυξηθεί έως και 20%. Αυτό μπορεί να καταστήσει μια επένδυση μη βιώσιμη, ειδικά αν η τιμή πώλησης είναι συγκεκριμένη από παλαιότερο διαγωνισμό.

5.4.3 Διαχείριση Ρίσκου και Διαφοροποίηση Μεσοσταθμικού Κόστους Κεφαλαίου

Η επένδυση σε αιολικά πάρκα δεν είναι μια στατική διαδικασία. Το προφίλ κινδύνου μεταβάλλεται δραματικά από τη στιγμή της σύλληψης της ιδέας μέχρι την απεγκατάσταση των ανεμογεννητριών μετά από 25 έτη. Αυτή η μεταβλητότητα αντανακλάται άμεσα στο κόστος κεφαλαίου.

Ένα από τα συνηθέστερα λάθη είναι η χρήση ενός ενιαίου WACC για όλη τη διάρκεια του έργου. Στην πραγματικότητα, το WACC ακολουθεί μια φθίνουσα πορεία καθώς το έργο ωριμάζει.

- **Φάση Ανάπτυξης (Development Phase):** Εδώ το WACC είναι στο υψηλότερο σημείο του (συνήα $>15\%$). Οι κίνδυνοι είναι κυρίως αδειοδοτικοί (permitting risk) και περιβαλλοντικοί. Πολλά έργα σταματούν σε αυτό το στάδιο, επομένως οι επενδυτές ζητούν πολύ υψηλές αποδόσεις για να αντισταθμίσουν την πιθανότητα ολικής απώλειας κεφαλαίου.
- **Φάση Κατασκευής (Construction Phase):** Το ρίσκο παραμένει υψηλό λόγω πιθανών καθυστερήσεων, αύξησης κόστους υλικών ή τεχνικών αστοχιών. Οι τράπεζες τιμολογούν το χρέος (R_d) με υψηλότερα spreads.
- **Φάση Λειτουργίας (Operational Phase):** Μόλις το πάρκο αρχίσει να παράγει ενέργεια, το WACC μειώνεται απότομα. Το ρίσκο είναι πλέον "λειτουργικό" (operational) και "αγοράς" (market risk). Σε αυτό το στάδιο γίνεται συχνά **Αναχρηματοδότηση (Refinancing)** με χαμηλότερα επιτόκια, βελτιώνοντας την κερδοφορία των μετόχων.

Ο τρόπος με τον οποίο το αιολικό πάρκο πληρώνεται για την ενέργεια που παράγει είναι ο καθοριστικότερος παράγοντας για το R_e (Κόστος Ιδίων Κεφαλαίων). Οι πιο συνηθισμένοι τρόποι πληρωμής είναι οι παρακάτω:

- **Feed-in Tariffs (FiT) / Feed-in Premiums (FiP):** Παρέχουν τη μέγιστη ορατότητα εσόδων. Το κράτος εγγυάται μια τιμή. Εδώ το WACC είναι το χαμηλότερο δυνατό (low risk).
- **Corporate PPAs (Συμβάσεις με Ιδιώτες):** Εδώ το ρίσκο εξαρτάται από την πιστοληπτική ικανότητα (credit rating) του αγοραστή (π.χ. μια βιομηχανία ή ένας τεχνολογικός κολοσσός). Αν ο αγοραστής είναι "Investment Grade", το WACC παραμένει χαμηλό.
- **Merchant Risk (Πώληση στη Χονδρεμπορική Αγορά):** Το πάρκο εκτίθεται στις διακυμάνσεις των τιμών του χρηματιστηρίου ενέργειας. Αυτό αυξάνει κατακόρυφα

το ρίσκο, με αποτέλεσμα οι τράπεζες να ζητούν χαμηλότερη μόχλευση (λιγότερο δάνειο, περισσότερα ίδια κεφάλαια) και υψηλότερο WACC.

Η τεχνολογία επηρεάζει το Beta (β) του κλάδου:

Χερσαία Αιολικά (Onshore)

Θεωρούνται "Safe Haven" για τους επενδυτές. Η τεχνολογία είναι δοκιμασμένη εδώ και δεκαετίες. Το WACC στην Ευρώπη για onshore έργα κινείται συνήθως στο **5% - 7%**.

Υπεράκτια Αιολικά (Offshore)

Εδώ το WACC είναι παραδοσιακά 100-200 μονάδες βάσης (1% - 2%) υψηλότερο από τα χερσαία. Ανάλογα με το τρόπο έδρασης, έχουμε:

- **Fixed-bottom:** Σταθερή θεμελίωση. Το ρίσκο αφορά κυρίως την εφοδιαστική αλυσίδα και τα υποθαλάσσια καλώδια.
- **Floating Offshore (Πλωτά):** Πρόκειται για την "αιχμή" της τεχνολογίας. Λόγω έλλειψης ιστορικών δεδομένων λειτουργίας, το WACC μπορεί να ξεπεράσει το **9% - 10%**, καθώς οι επενδυτές αντιμετωπίζουν το έργο σχεδόν σαν "venture capital".

Η αβεβαιότητα του ανέμου (Wind yield uncertainty) αναλύεται μέσω των δεικτών P50 και P90:

- P50: Η παραγωγή που αναμένεται να επιτευχθεί με πιθανότητα 50%.
- P90: Η συντηρητική εκτίμηση (πιθανότητα 90%). Οι τράπεζες βασίζονται στο δανεισμό τους στο σενάριο P90. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση (variance) μεταξύ P50 και P90 σε μια περιοχή, τόσο αυξάνεται το κόστος δανεισμού (R_d), συμπαρασύροντας το WACC προς τα πάνω.

5.4.4 Το Μεσοσταθμικό Κόστος Κεφαλαίου στην Ελλάδα

Το WACC στην Ελλάδα θα είναι, για παράδειγμα, πάντα υψηλότερο από αυτό στη Γερμανία, ακόμα και για το ίδιο ακριβώς πάρκο με τις ίδιες τουρμπίνες. Οι κίνδυνοι στους οποίους οφείλεται αυτό είναι:

- **Country Risk Premium:** Προστίθεται στο Risk-free rate. Περιλαμβάνει τον κίνδυνο πολιτικής αστάθειας, αλλαγής της φορολογίας ή καθυστερήσεων στις δικαστικές αποφάσεις (π.χ. προσφυγές στο ΣτΕ).

- **Grid Risk (Κίνδυνος Δικτύου):** Η πιθανότητα να μην μπορεί το δίκτυο να απορροφήσει την ενέργεια (curtailments). Αν ένας επενδυτής φοβάται ότι το 10% της ενέργειάς του θα "πετάγεται" χωρίς αποζημίωση, θα αυξήσει τις απαιτήσεις απόδοσής του, άρα και το WACC.

5.5 Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας

Το Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας (LCOE) αποτελεί το θεμελιώδες μετρικό σύστημα για την αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας των τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ορίζεται ως η παρούσα αξία του συνολικού κόστους κατασκευής και λειτουργίας μιας εγκατάστασης παραγωγής ενέργειας κατά τη διάρκεια του οικονομικού κύκλου ζωής της, διαιρούμενη με τη συνολική παραχθείσα ενέργεια, προεξοφλημένη στο παρόν.

5.5.1 Το Μαθηματικό Μοντέλο υπολογισμού του Σταθμισμένου Κόστους Ενέργειας

Η μεθοδολογία βασίζεται στην αρχή της προεξόφλησης των ταμειακών ροών (Discounted Cash Flow - DCF). Η μαθηματική έκφραση του LCOE είναι:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

όπου:

- I_t : Οι επενδυτικές δαπάνες (CAPEX) στο έτος t .
- M_t : Λειτουργικές δαπάνες και δαπάνες συντήρησης (OPEX).
- F_t : Το κόστος καυσίμου (για τα αιολικά είναι **μηδέν**, που είναι και το μεγάλο τους πλεονέκτημα).
- E_t : Ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (MWh).
- r : Προεξοφλητικό επιτόκιο (WACC – το κόστος του κεφαλαίου).
- n : Οικονομική διάρκεια ζωής του πάρκου (συνήθως 20 – 25 έτη).

5.5.2 Τεχνικοί Παράμετροι που Επηρεάζουν το LCOE

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον δείκτη του Σταθμισμένου Κόστους Ενέργειας σχετίζονται με:

1. Τον συντελεστή ισχύος (Capacity Factor)

Είναι ο λόγος της πραγματικής παραγωγής ενέργειας προς τη θεωρητική μέγιστη παραγωγή. Στα χερσαία αιολικά κυμαίνεται στο 25-40%, ενώ στα υπεράκτια μπορεί να ξεπεράσει το 50%. Μια αύξηση στον συντελεστή ισχύος μειώνει δραστικά το

LCOE, καθώς ο παρονομαστής του κλάσματος μεγαλώνει χωρίς ανάλογη αύξηση του κόστους.

2. Η καμπύλη μάθησης (Learning Curve)

Η τεχνολογική εξέλιξη (μεγαλύτερες διαμέτροι ρότορα, ψηλότεροι πύργοι) οδηγεί σε οικονομίες κλίμακας. Κάθε διπλασιασμός της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος επιφέρει ιστορικά μια μείωση του LCOE κατά περίπου 15%.

3. Το Κόστος Κεφαλαίου (WACC)

Λόγω της έντασης κεφαλαίου (υψηλό CAPEX), το LCOE των αιολικών είναι εξαιρετικά ευαίσθητο στα επιτόκια. Μια αύξηση του r κατά 2% μπορεί να αυξήσει το LCOE περισσότερο από μια αντίστοιχη αύξηση στο κόστος των υλικών (π.χ. χάλυβας).

5.6 Απόσβεση Αιολικού Πάρκου

Η οικονομική ανάλυση και η απόσβεση των αιολικών πάρκων αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για τη βιωσιμότητα των επενδύσεων στις ΑΠΕ. Λόγω της φύσης των αιολικών έργων, τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος κεφαλαίου (CAPEX) και σχετικά χαμηλό λειτουργικό κόστος (OPEX), η διαδικασία της απόσβεσης καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την τιμή της παραγόμενης ενέργειας (LCOE).

Στο πλαίσιο των αιολικών επενδύσεων, η απόσβεση αναφέρεται στη συστηματική κατανομή του κόστους κτήσης των ανεμογεννητριών και των συνοδών έργων (θεμελιώσεις, υποσταθμοί, δίκτυα) κατά τη διάρκεια της ωφέλιμης οικονομικής ζωής τους. Σύμφωνα με τον Blanco (2009), το κόστος κεφαλαίου αντιπροσωπεύει περίπου το **75-80%** του συνολικού κόστους παραγωγής ενέργειας ενός αιολικού πάρκου.

5.6.1 Είδη Αποσβέσεων στα Αιολικά Πάρκα

Στην οικονομική επιστήμη και τη λογιστική πρακτική, διακρίνουμε τέσσερα κύρια είδη αποσβέσεων που εφαρμόζονται στα αιολικά πάρκα:

1. Λογιστική απόσβεση

Πρόκειται για την καταγραφή της μείωσης της αξίας των παγίων στα λογιστικά βιβλία της επιχείρησης.

- **Σταθερή Απόσβεση (Straight-line):** Το κόστος κατανέμεται ισόποσα στα έτη ζωής του έργου (συνήθως 20-25 έτη).

Είναι η συνηθέστερη μέθοδος για τα αιολικά πάρκα, όπου το κόστος κατανέμεται ισόποσα

$$D = \frac{C - S}{n}$$

όπου:

- D : Η ετήσια απόσβεση.
 - C : Το αρχικό κόστος επένδυσης (CAPEX).
 - S : η υπολειμματική αξία (salvage value) στο τέλος της ζωής του έργου.
 - n : Η ωφέλιμη διάρκεια ζωής (σε έτη).
- **Φθίνουσα Απόσβεση (Accelerated)**: Επιτρέπει μεγαλύτερες αποσβέσεις στα πρώτα έτη, γεγονός που ευνοεί τη ρευστότητα μέσω φορολογικών ελαφρύνσεων. Χρησιμοποιείται για την επιτάχυνση των αποσβέσεων στα πρώτα έτη, κάτι που συχνά ευνοεί τη φορολογική στρατηγική των επενδυτών.

$$D_k = d \cdot BV_{k-1}$$

όπου:

- D_k : Η ετήσια απόσβεση της k περιόδου χρήσης
- d : Ο συντελεστής απόσβεσης, ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$d = 1 - \left(\frac{S}{C}\right)^{\frac{1}{N}}$$

- BV_{k-1} : Η αναπόσβεστη αξία του έργου της $(k-1)$ χρήσης. Την χρονική στιγμή για $t=0$, ισούται με το αρχικό κόστος επένδυσης. Στο τέλος της ωφέλιμης ζωής ισούται με την υπολειμματική αξία.

2. Φυσική απόσβεση

Αφορά τη φθορά των μηχανικών μερών της ανεμογεννήτριας (πτερύγια, κιβώτιο ταχυτήτων, γεννήτρια) λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών (κόπωση υλικών, διάβρωση). Η φυσική απόσβεση επηρεάζει άμεσα το κόστος συντήρησης, το οποίο αυξάνεται εκθετικά μετά τα πρώτα 10-12 έτη λειτουργίας (**Wiser et al., 2021**).

Στα αιολικά πάρκα, η φυσική απόσβεση δεν είναι μόνο λογιστική αλλά και λειτουργική, καθώς η απόδοση της ανεμογεννήτριας φθίνει. Αυτό εκφράζεται συχνά με έναν συντελεστή ετήσιας πτώσης της απόδοσης:

$$P_t = P_0 \cdot (1 - \delta)^t$$

Όπου:

- P_t : Η παραγόμενη ισχύς τη χρονική στιγμή t .
- P_0 : Η αρχική ονομαστική ισχύς.
- δ : Ο ρυθμός ετήσιας τεχνικής υποβάθμισης (κυμαίνεται από 0,5 – 1,6% ετησίως).

3. Τεχνολογική/Οικονομική απαξίωση

Συμβαίνει όταν η υπάρχουσα τεχνολογία καθίσταται ξεπερασμένη από νεότερες, πιο αποδοτικές τουρμπίνες (μεγαλύτερη διάμετρος ρότορα, ψηλότεροι πυλώνες). Αυτό οδηγεί συχνά στη διαδικασία του **Repowering** (ανακαίνιση), όπου οι παλιές ανεμογεννήτριες αντικαθίστανται πριν από το τέλος της φυσικής τους ζωής για τη βελτίωση της απόδοσης.

Αυτό το μοντέλο υπολογίζει τη μείωση της αξίας με βάση τη μεταβολή των μελλοντικών καθαρών εσόδων. Αν V_t είναι η παρούσα αξία των μελλοντικών εσόδων στο χρόνο t :

$$D_{econ,t} = V_t - V_{t+1}$$

όπου η αξία V_t ορίζεται ως:

$$V_t = \sum_{k=t}^n \frac{R_k - O_k}{(1+i)^{k-t}}$$

όπου:

- R_k : Αναμενόμενα έσοδα για το χρονικό έτος k .
- O_k : Τα λειτουργικά έξοδα (OPEX) για το χρονικό έτος k .

Όσον αφορά για το συγκεκριμένο έργο, για το οποίο γίνεται αναφορά, θα πραγματοποιηθεί με την μέθοδο φυσικής απόσβεσης.

5.7 Οφέλη παραγωγής

Η παραγωγή αιολικής ενέργειας αποτελεί σήμερα έναν από τους κεντρικούς πυλώνες της παγκόσμιας ενεργειακής μετάβασης. Τα οφέλη των αιολικών πάρκων δεν περιορίζονται μόνο στο περιβάλλον, αλλά εκτείνονται στην οικονομία, την ενεργειακή ασφάλεια και την τεχνολογική καινοτομία.

Τα οφέλη της είναι τα εξής:

1. Περιβαλλοντικά οφέλη και Κλιματική Ουδετερότητα

Η αιολική ενέργεια είναι η «αιχμή του δόρατος» για την επίτευξη των στόχων του Net Zero έως το 2050. Αυτό οφείλεται στους εξής παράγοντες:

- Μείωση Εκπομπών Αερίων Θερμοκηπίου: Βάσει της έκθεσης του International Energy Agency (IEA, 2023), το ενεργειακό δυναμικό του ανέμου απέτρεψε την έκλυση δισεκατομμυρίων τόνων CO₂. Κάθε μεγαβατώρα (MWh) που παράγεται από αιολικά αντικαθιστά ενέργεια από ορυκτά καύσιμα, μειώνοντας άμεσα το ανθρακικό αποτύπωμα της βιομηχανίας.
- Προστασία Υδάτινων Πόρων: Σε αντίθεση με τους πυρηνικούς ή τους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, οι Α/Γ δεν απαιτούν νερό για την ψύξη τους. Αυτό αποτελεί σημαντικό παράγοντα ιδίως σε περιοχές που εμφανίζουν έντονη λειψυδρία, ένα πρόβλημα που επιτείνεται από την κλιματική αλλαγή (DORA 4RI, 2025).
- Κυκλική οικονομία: Με τον όρο «κυκλική» γίνεται αναφορά ως προς την ανακύκλωση των αιολικών συστημάτων. Από το 2024, η έρευνα επικεντρώνεται στην ανακύκλωση των πτερυγίων. Με την βοήθεια της τεχνολογίας επιτυγχάνεται πλήρη αποσυναρμολόγηση και επαναχρησιμοποίηση των υλικών, καθιστώντας τον κύκλο ζωής ενός αιολικού πάρκου χωρίς την εμφάνιση αποβλήτων, εφόσον εξασφαλίζεται η ανακύκλωσή του.

Η επίτευξη αυτών έγινε από την συμμετοχή μεγάλων κολοσσιαίων εταιριών όπως η Vestas και η Siemens Gamesa με σκοπό την εξέλιξη της τεχνολογίας ως προς την ανακύκλωση των πτερυγίων και στην προστασία της βιοποικιλότητας, με τη χρήση νέων συστημάτων SCADA και τη βοήθεια της ΑΙ τεχνολογίας.

2. Οικονομικά οφέλη και Εγχώρια Προστιθέμενη Αξία

Τα αιολικά συστήματα έχουν μετατραπεί από μία «ακριβή εναλλακτική» στην πιο φθηνή πηγή παραγωγής ηλεκτρισμού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι:

- Τα δεδομένα της ΕΛΕΤΑΕΝ (2024) δείχνουν ότι η αιολική ενέργεια πωλείται σε τιμές σημαντικά χαμηλότερες από το φυσικό αέριο με την τιμή της μεγαβατόρας να κυμαίνεται περίπου 57 – 60€/MWh σε σχέση με τις διακυμάνσεις των ορυκτών καυσίμων. Αυτό δρα ως «ασπίδα» προστασίας απέναντι στις ενεργειακές κρίσεις.
- Πραγματοποιούνται επενδύσεις και εμφανίζονται ευκαιρίες για θέσεις εργασίας. Ειδικά στην Ελλάδα, το πρώτο εξάμηνο του 2024 πραγματοποιήθηκαν επενδύσεις της άνω των 110 εκατ. ευρώ. Με την ανάπτυξη των αιολικών πάρκων δόθηκε η

ευκαιρία για νέες θέσεις εργασίας βοηθώντας στους τομείς της κατασκευής, της λειτουργίας και της συντήρησης του αιολικού πάρκου.

- Με την συμβολή των αιολικών πάρκων ενισχύονται οικονομικά οι τοπικές κοινωνίες. Τα αιολικά πάρκα αποδίδουν ανταποδοτικά τέλη, περίπου 3%, στις Δημοτικές Κοινότητες, χρηματοδοτώντας τοπικά έργα υποδομής και μειώνοντας τους λογαριασμούς ρεύματος των τοπικών νοικοκυριών.

3. Ενεργειακή ασφάλεια και Αυτονομία

Η πρόσφατη γεωπολιτική αστάθεια, που εμφανίστηκε το χρονικό διάστημα 2022 έως 2026, ανέδειξε τη σημασία της ενεργειακής αυτονομίας. Αυτό κατορθώθηκε με τους εξής τρόπους:

- Η αιολική ενέργεια αποτελεί εγχώρια πηγή. Κάθε νέα ανεμογεννήτρια μειώνει την ανάγκη για την εισαγωγή φυσικού αερίου, βελτιώνοντας το εμπορικό ισοζύγιο της χώρας.
- Με την ανάπτυξη και την εξέλιξη τα τελευταία χρόνια, οι Α/Γ διαθέτουν προηγμένα συστήματα ελέγχου που προσφέρουν συνθετική αδράνεια (Grid – forming Inverters). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να προστατεύεται η γεννήτρια, να διατηρείται η συχνότητα σταθερή στην ονομαστική τιμή, παρά τις παρεμβολές που μπορούν να παρουσιαστούν στο δίκτυο (έρευνα McKenna et al., 2025).

Οικονομική Αξιολόγησης Επένδυσης Αιολικού Έργου στο Αντίρριο Αιτωλοακαρνανίας

Στον παρόν εργασίας, ως μελέτη περίπτωσης, παρουσιάζεται η προμελέτη σχεδιασμού εγκατάστασης και η οικονομική αξιολόγησή της σχετικής επένδυσης ενός αιολικού πάρκου δυναμικότητας 20 MW, αποτελούμενο από 10 ανεμογεννήτριες που θα εγκατασταθεί σε ορεινή περιοχή του Αντιρρίου Αιτωλοακαρνανίας λόγω του καλού αιολικού δυναμικού που παρουσιάζει.

6.1 Στοιχεία Τοποθεσίας εγκατάστασης του αιολικού Πάρκου

Το αιολικό πάρκο επιλέγεται να εγκατασταθεί στην περιοχή του Αντιρρίου Αιτωλοακαρνανίας στοχεύοντας στην εκμετάλλευση των ιδιαίτερων κλιματολογικών συνθηκών του Κορινθιακού Κόλπου. Η εγκατάσταση θα εκτείνεται στις κορυφογραμμές του όρους Κλόκοβα στην περιοχή Μολύκρειο (Εικ. 6.1, 6.2), που βρίσκεται βόρεια του Αντιρρίου. Το σημείο αυτό είναι ορεινό με υψόμετρο από 450 – 850 μέτρα. Στο σημείο εγκατάστασης υπάρχει ένα «σκαλοπάτι» στο ανάγλυφο, το οποίο αναμένεται να προκαλεί τοπικές αναταράξεις (turbulence), οι οποίες θα ληφθούν υπόψη στο σχεδιασμό της αντοχής των πτερυγίων. Οι ανεμογεννήτριες είναι επιλέγεται να τοποθετηθούν σε γραμμική διάταξη κατά μήκος των κορυφογραμμών με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπεται η απρόσκοπτη έκθεση των πτερυγίων στους επικρατούντες ανέμους της περιοχής (Δυτικούς – Βορειοδυτικούς και Ανατολικούς). Το έδαφος χαρακτηρίζεται από έντονες κλίσεις, που υπερβαίνουν το 30 – 40% στα πρηνή. Αυτό απαιτεί εκτεταμένες χωματουργικές εργασίες για τη δημιουργία επίπεδων πλατειών εγκατάστασης (crane pads), οι οποίες πρέπει να είναι περίπου 2500 – 4000 τ.μ. ανά ανεμογεννήτρια.

Η μορφολογία του εδάφους αποτελείται κυρίως από ασβεστόλιθους και φλύσχη. Ο ασβεστόλιθος προσφέρει εξαιρετική φέρουσα ικανότητα για τις θεμελιώσεις, αλλά η παρουσία υπόγειων κοιλοτήτων απαιτεί λεπτομερή γεωφυσική διασκόπηση με γεωραντάρ πριν από την σκυροδέτηση. Επίσης, λόγω της αποψίλωσης που απαιτείται για τους δρόμους, η μελέτη εστιάζει στην προστασία από τη διάβρωση με τη χρήση γεωπλεγμάτων και φύτευση των πρηνών.

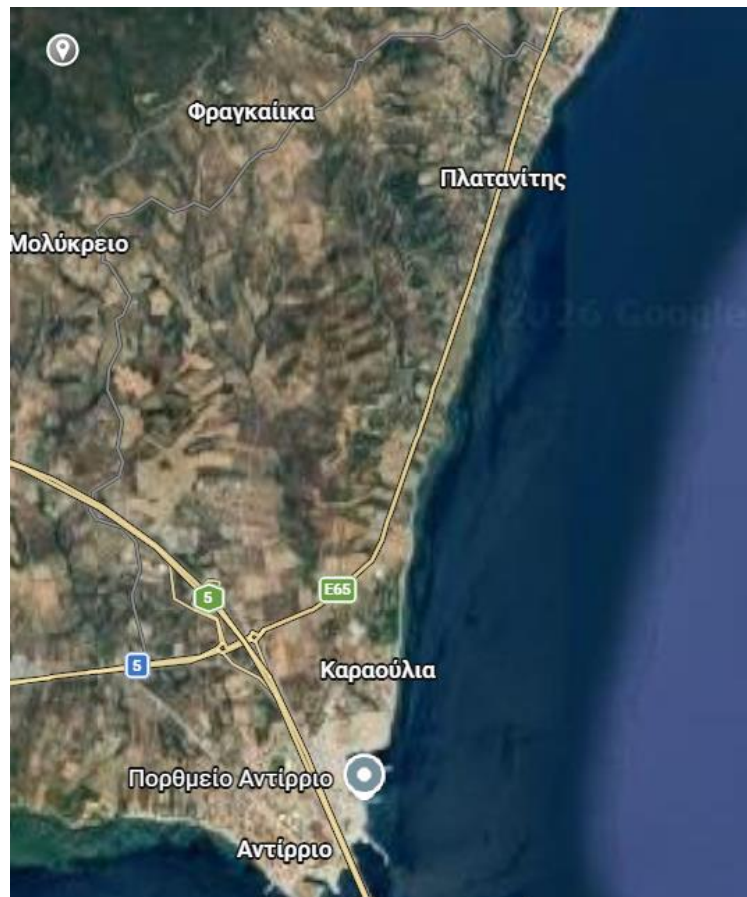
Όσον αφορά την πρόσβαση στο αιολικό πάρκο θεωρείται ένα από τα ισχυρά του πλεονεκτήματα, λόγω την γειτνίασης με στρατηγικές υποδομές μεταφορών. Οι

μεταφορές γίνονται σε λιμένες εκφόρτωσης, όπου εκεί τα τμήματα των ανεμογεννητριών (πυλώνες, πτερύγια, άτρακτοι, κλπ) φτάνουν συνήθως στον Λιμένα της Πάτρας. Ακόμη, για την οδική μεταφορά των εξαρτημάτων σημαντική συμβολή θα έχει η γέφυρα Ρίου – Αντιρρίου, ιδίως για το ειδικό όχημα μεταφοράς των πτερυγίων (blade trailers), το μήκος του οποίου ξεπερνά τα 60 μέτρα. Επίσης σημαντική συμβολή θα έχει και Ιόνια Οδός, η χρήση της οποίας μειώνει δραστικά τους χρόνους πρόσβασης για τα συνεργεία συντήρησης και παρέχει ασφαλή πρόσβαση για τα βαρέα οχήματα, αποφεύγοντας τις παλιές στενές εθνικές οδούς που διέρχονταν μέσα από κατοικημένες περιοχές.

Για τη διέλευση των πτερυγίων στα ορεινά σημεία, θα σχεδιασθεί η οδοποιία της διαδρομής, με κυρίες προδιαγραφές: (i) οι εσωτερικές στροφές του βουνού να έχουν εξωτερική ακτίνα τουλάχιστον 40-45 μέτρα, (ii) η κλίση να μην υπερβαίνει το 10 – 12% (ώστε να αποφευχθεί η χρήση προωθητήρων για ρυμούλκηση) και (iii) η φέρουσα ικανότητα της οδού να είναι άνω των 12 – 15 τόνων αξονικού φορτίου. Σε σημεία της οδού, όπου η προδιαγραφή (i) δεν είναι εφικτή θα υπάρχει πρόβλεψη χρήσης μηχανημάτων που ανασκώνουν το πτερύγιο κάθετα.



Εικόνα 6.1: Χωροθέτηση των ανεμογεννητριών στο Αντίρριο



Εικόνα 6.2: Τμήμα συντεταγμένων εγκατάστασης αιολικού πάρκου

6.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Ανεμογεννητριών του Πάρκου

Το μοντέλο ανεμογεννήτριας που επιλέγεται να τοποθετηθεί είναι της Siemens Gamosa G90 (Εικ. 6.3) δυναμικότητας 2 MW. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά είναι τα εξής:

- Ονομαστική ισχύς: 2 MW.
- Διάμετρος ρότορα: 90 m.
- Επιφάνεια Σάρωσης: 6362m².
- Μήκος Πτερυγίου: 44m.
- Ύψος Πλήμνης: 80m.
- Ταχύτητα Ανέμου Έναρξης ($V_{\text{Cut-in}}$): 3 m/s.
- Ταχύτητα Ανέμου Ονομαστική (V_{rated}): 12-13 m/s.
- Ταχύτητα Ανέμου Διακοπή ($V_{\text{Cut-out}}$): 25 m/s.
- Κλάση Ανέμου: IEC IIA.
- Καμπύλη ισχύος: Η καμπύλη ισχύος με δεδομένο ότι η πυκνότητα του αέρα στο συγκεκριμένο σημείο του έργου, είναι στα 1,12kg/m³, παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.1.



Εικόνα 6.3: Απεικόνιση μοντέλου Siemens Gamesa G90

Πίνακας 6.1: Καμπύλη Ισχύος για πυκνότητα αέρα 1,12kg/m³

Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Ισχύς (kW) – Για πυκνότητα αέρα 1,12 kg/m³
3	24
4	58,5
5	137
6	253
7	415
8	629
9	891
10	1.183
11	1.475
12	1.722
13	1.881
14	1.958
15	1.987
16	1.996
17	1.999
18	2.000
19	2.000
20	2.000
21	2.000
22	2.000
23	2.000
24	2.000
25	2.000

Σημειώνεται ότι η πραγματική πυκνότητα του αέρα στο σημείο εγκατάστασης του έργου είναι 1,12 kg/m³, διαφοροποιούμενη από την αρχικά επιλεγείσα τιμή αναφοράς των 1,225 kg/m³. Η συγκεκριμένη απόκλιση αποτελεί συνάρτηση της υψομετρικής διαφοράς μεταξύ της θέσης του έργου και της μέσης στάθμης της θάλασσας (Mean Sea Level). Η τιμή 1,225 kg/m³ αντιστοιχεί στην πυκνότητα του αέρα υπό πρότυπες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (Διεθνής Πρότυπος Ατμόσφαιρα - ISA) σε μηδενικό υψόμετρο. Με την αύξηση του υψόμετρου, η βαρομετρική πίεση μειώνεται εκθετικά, γεγονός που συνεπάγεται τη μείωση της συγκέντρωσης των ατμοσφαιρικών μορίων ανά μονάδα όγκου και, κατ' επέκταση, τη μείωση της πυκνότητας του αέρα.

Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την πυκνότητα είναι η θερμοκρασία και η υγρασία. Η θερμοκρασία αποτελεί τον πιο ευμετάβλητο παράγοντα κατά τη διάρκεια του εικοσιτετράωρου και των εποχών. Όταν ο αέρας θερμαίνεται, τα μόριά του κινούνται ταχύτερα και απομακρύνονται μεταξύ τους, καταλαμβάνοντας μεγαλύτερο όγκο· επομένως, ο ζεστός αέρας είναι λιγότερο πυκνός. Αντίθετα, στον κρύο αέρα τα μόρια συμπυκνώνονται, καθιστώντας τον πιο πυκνό και βαρύ.. Περαιτέρω, η υγρασία επηρεάζει την πυκνότητα του αέρα, διότι ο υγρός αέρας είναι λιγότερο πυκνός σε σχέση με τον ξηρό αέρα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα μόρια των υδρατμών είναι ελαφρύτερα από τα μόρια του αζώτου και του οξυγόνου, που αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος της ατμόσφαιρας. Όταν η υγρασία αυξάνεται οι ελαφρύτεροι υδρατμοί αντικαθιστούν τα βαρύτερα μόρια, μειώνοντας τη συνολική πυκνότητα.

Σημειώνεται ότι η πυκνότητα (ρ) του αέρα σχετίζεται με την κινητική ενέργειά του (E), μέσω της σχέσης:

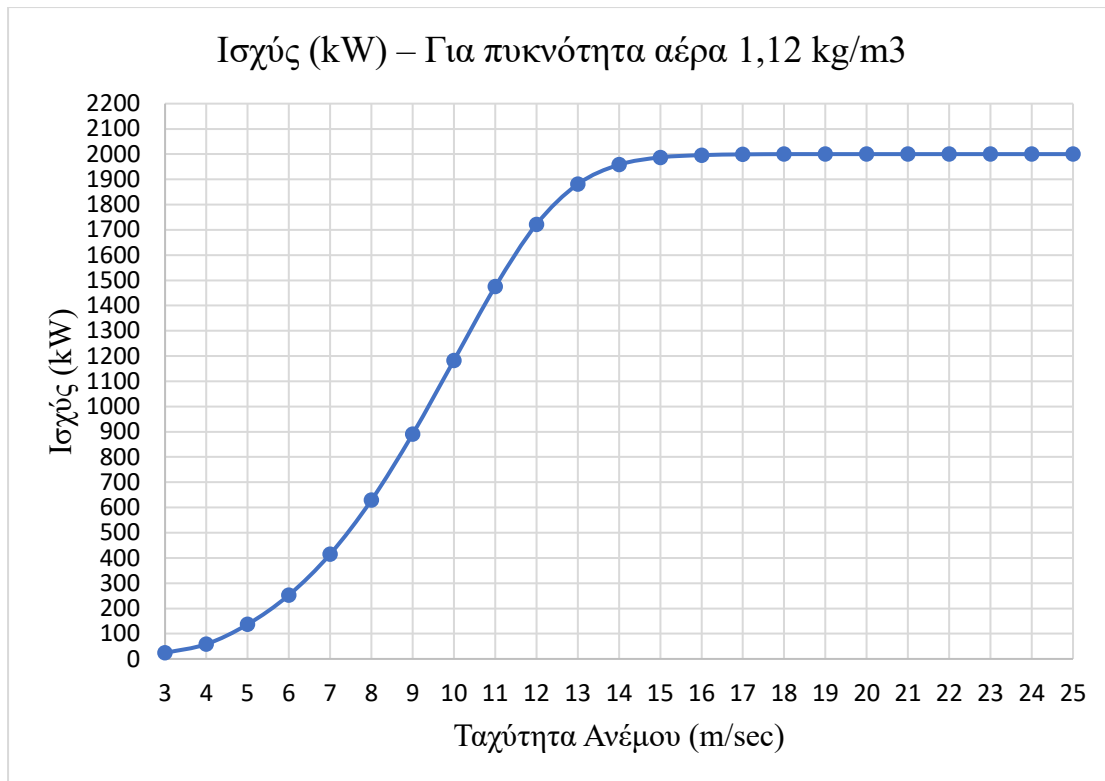
$$E = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot u^3$$

Όπου:

- A : Η επιφάνεια σάρωσης είναι η κάθετη επιφάνεια που έρχεται σε επαφή η ταχύτητα του ανέμου. Στις A/Γ οριζοντίου άξονα, είναι ο κύκλος που σχηματίζουν τα πτερύγια καθώς περιστρέφονται ($A=\pi \cdot r^2$ με r το μήκος του πτερυγίου) με μονάδα μέτρησης m^2 .
- u : Η ταχύτητα του αέρα και μετριέται σε m/sec .

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι η κινητική ενέργεια του ανέμου είναι ανάλογη της πυκνότητάς του.

Στο σχήμα της Εικόνας 6.3 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική Καμπύλη Ισχύος του τύπου της A/Γ που θα χρησιμοποιηθεί (Siemens Gamosa G90) ως συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου



Εικόνα 6.4: Χαρακτηριστική Καμπύλη Ισχύος του μοντέλου G90

Το συγκεκριμένου μοντέλο Α/Γ επιλέχτηκε κυρίως για την αξιοπιστία του. Η συγκεκριμένη πλατφόρμα G8X/G9X υπάρχει σε χιλιάδες εγκαταστημένες μονάδες παγκοσμίως. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι είναι ένα αξιόπιστο και δοκιμασμένο μοντέλο και με μεγάλη διαθεσιμότητα. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα του μοντέλου είναι η ευκολία στη μεταφορά. Παρά το μέγεθός της, η G90 είναι σχεδιασμένη με τέτοιο τρόπο ώστε τα τμήματά της να μεταφέρονται σχετικά εύκολα σε ορεινά οδικά δίκτυα, πλεονέκτημα το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό δεδομένο ότι πάρκο θα εγκατασταθεί σε κορυφογραμμές. Τέλος, πέρα από την αξιοπιστία και την ευκολία μεταφοράς, το μοντέλο Α/Γ που θα χρησιμοποιηθεί, έχει καλή προσαρμοστικότητα. Λόγω της διαμέτρου του ρότορα, που είναι 90 μέτρα, εμφανίζει εξαιρετική απόδοση σε περιοχές όπου ο άνεμος δεν είναι σταθερά πολύ ισχυρός, αλλά κυμαίνεται σε μέτρια επίπεδα, όπως συμβαίνει στο σημείο εγκατάστασης.

6.2.1 Κλάση του ανέμου στο σημείο εγκατάστασης του αιολικού πάρκου

Η κλάση του ανέμου σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο IEC 61400-1 κατηγοριοποιείται με έναν λατινικό αριθμό (I, II ή III) ακολουθούμενο από ένα λατινικό γράμμα (A, B, ή C). Οι λατινικοί αριθμοί κατηγοριοποιούν τις Α/Γ βάσει της έντασης του ανέμου και την αντοχή τους σε μέσες και ακραίες ριπές ανέμου ως εξής:

- Κλάση I: Είναι για περιοχές με πολύ ισχυρούς ανέμους. Η Α/Γ αντέχει μέση ταχύτητα 10 m/s και ακραία ριπή έως 70m/s.
- Κλάση II: Είναι για τοποθεσίες με μέτριους ανέμους. Η Α/Γ αντέχει μέση ταχύτητα 8,5 m/s και ακραία ριπή έως 59,5 m/s.
- Κλάση III: Είναι για περιοχές με ασθενείς ανέμους. Η Α/Γ αντέχει μέση ταχύτητα 7,5 m/s και ακραία ριπή έως 52,5 m/s. Σημειώνεται ότι οι Α/Γ αυτής της κλάσης έχουν πολύ μεγάλα πτερύγια για να αναπτύσσουν κίνηση ακόμα και με την εμφάνιση παραμικρού αέρα.

Περαιτέρω, τα γράμματα κατηγοριοποιούν την ένταση της τύρβης, η οποία είναι ανάλογη των μεταβολών που παρουσιάζει ο άνεμος στην περιοχή, ως εξής:

- A: Σημαίνει υψηλή τύρβη και εμφανίζει έντονες και συχνές μεταβολές στην ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου.
- B: Σημαίνει μέτρια τύρβη.
- C: Χαμηλή τύρβη και η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι σταθερή.

Η επιλογή της κλάσης ουσιαστικά γίνεται για την ασφάλεια της Α/Γ, το κόστος και την απόδοσή της. Η ασφάλεια έχει να κάνει με το χαρακτηριστικό λατινικό νούμερο της Α/Γ. Αν τοποθετηθεί μια ανεμογεννήτρια κλάσης III σε σημείο που θεωρείται κλάσης I τότε, υπάρχει κίνδυνος δομικής αστοχίας ή ακόμη και θραύσης των πτερυγίων σε περίπτωση εμφάνισης καταιγίδας, διότι τα πτερύγια είναι πολύ μακριά και ελαφριά για τέτοιες δυνάμεις.

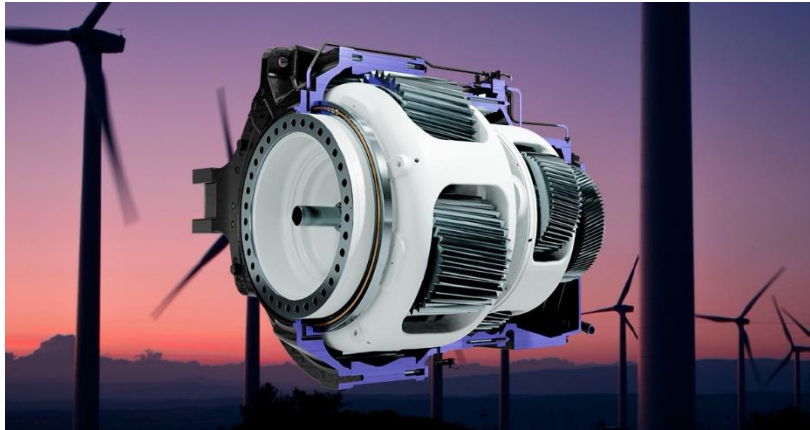
Σχετικά με το κόστος και την απόδοση, αν η Α/Γ ήταν κλάσης I, ενώ θα έπρεπε να είναι άλλης κλάσης, αυτό σημαίνει ότι χρησιμοποιείται πιο ανθεκτική, πιο βαριά και πιο ακριβή σε σχέση με αυτή που θα επαρκούσε και επιπλέον επειδή στο σημείο τοποθέτησής της πνέουν πιο ασθενείς άνεμοι σε σχέση με αυτούς του σχεδιασμού της, θα λειτουργεί με μειωμένη απόδοση παράγοντας λιγότερο ρεύμα από αυτό που θα παρήγαγε η κατάλληλη κλάση για το σημείο.

Για το σημείο εγκατάστασης του συγκεκριμένου πάρκου, όπου πνέουν μέτριοι προς ισχυροί άνεμοι με υψηλές αναταράξεις λόγω των γύρω βουνών, η κατάλληλη επιλογή κλάσης είναι ΙΙΑ.

6.2.2 Τεχνολογία της Α/Γ Siemens Gamosa G90

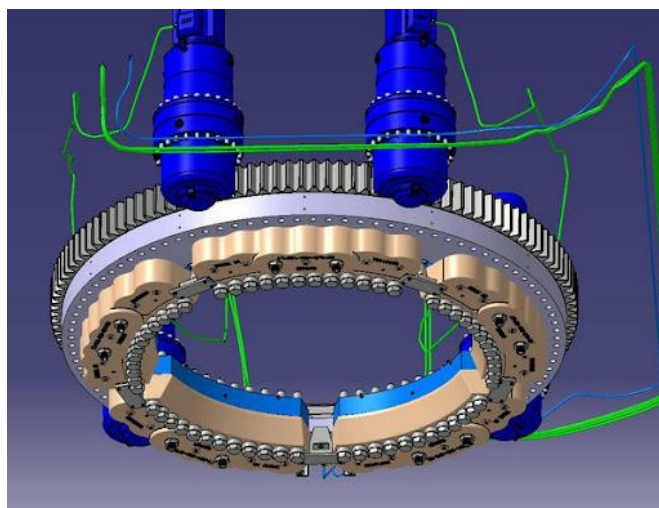
Η Α/Γ Siemens Gamosa G90, παρουσιάζει τις κάτωθι τεχνολογικές ιδιαιτερότητες:

1. Τα πτερύγια της είναι κατασκευασμένα από πολυεστέρα ενισχυμένο με υαλοβάμβακα και ανθρακονήματα. Η σχεδίαση των πτερυγίων της G90 εστιάζει στη μείωση του αεροδυναμικού θορύβου, κάτι που την καθιστά κατάλληλη για τοποθεσίες που γειτνιάζουν με οικισμούς.
2. Η γεννήτρια που χρησιμοποιεί είναι διπλής τροφοδοσίας (Doubly Fed Induction Generator). Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει στην ανεμογεννήτρια να λειτουργεί σε μεταβλητές στροφές, προσαρμοζόμενη στις ριπές του ανέμου, γεγονός που μεγιστοποιεί την παραγωγή ενέργειας και μειώνει τις μηχανικές καταπονήσεις στον άξονα.
3. Κάθε πτερύγιο μπορεί να στρίβει γύρω από τον άξονά του (pitch control), ώστε να τοποθετείται στην ιδανική μέγιστης απόδοσης. Περαιτέρω, με αυτό τον τρόπο καθίσταται δυνατή η πέδηση, στις περιπτώσεις πολύ ισχυρών ή ασθενών ανέμων..
4. Ο λόγος μετάδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων (Εικ. 6.4), για το δίκτυο της Ελλάδας, είναι 1:100,5, ήτοι για κάθε πλήρη περιστροφή που κάνουν τα πτερύγια, ο άξονας της γεννήτριας περιστρέφεται 100,5 στροφές. Αυτό η σχέση συνεπάγεται ότι, αν η ταχύτητα των πτερυγίων είναι 9 έως 19 rpm, η ταχύτητα που αναπτύσσεται στην είσοδο της γεννήτριας είναι περίπου 900 έως 1900 rpm, με την ονομαστική ταχύτητα να είναι 1680 rpm. Η τεχνική δομή του κιβωτίου (Εικόνα 5.4) αποτελείται από τρία στάδια. Το πρώτο στάδιο (πλανητικό) αναλαμβάνει να διαχειριστεί την τεράστια ροπή που έρχεται από τα πτερύγια και τα άλλα δύο στάδια 2 και 3 (ελικοειδή) αυξάνουν σταδιακά τις στροφές μέχρι να φτάσουν στο επιθυμητό επίπεδο για τη γεννήτρια. Δεδομένου ότι, στο κιβώτιο παρουσιάζονται τρομερές πιέσεις αναπτύσσοντας θερμότητα, υπάρχει σύστημα ψύξης και λίπανσης. Αυτό αποτελείται από μια αντλία λαδιού που κυκλοφορεί το λιπαντικό μέσω ενός ψύκτη για να διατηρείται η θερμοκρασία σταθερή. Επιπλέον, υπάρχει θερμοαντήρας λαδιού, ο οποίος ζεσταίνει το λάδι, κυρίως τις κρύες μέρες του χειμώνα, ώστε να αποκτήσει τη σωστή ρευστότητα πριν ξεκινήσει η περιστροφή. Τέλος, στο κιβώτιο υπάρχουν αποσβεστήρες κραδασμών, προκειμένου τα γρανάζια να προστατεύονται από απότομες ριπές του ανέμου.



Εικόνα 6.5: Κιβώτιο ταχυτήτων

5. Το σύστημα προσανατολισμού (Yaw system) (Εικ. 6.5) αποτελείται από 4 έως 6 ηλεκτρικούς κινητήρες κατηγορίας AC που λειτουργούν με μειωτήρες. Στον άξονά τους έχουν μικρά γρανάζια και έρχονται σε επαφή με ένα τεράστιο οδοντωτό στεφάνι, το οποίο βρίσκεται στην κορυφή του πυλώνα. Η περιστροφή των γραναζιών, αναγκάζει σε περιστροφή την άτρακτο έως την ιδανική κατεύθυνση, όπου και ενεργοποιείται το σύστημα πέδησής της. Το τελευταίο, αποτελείται από υδραυλικές δαγκάνες και δίσκους. Η εύρεση του ιδανικού προσανατολισμού της ατράκτου ελέγχεται μέσω αισθητήρων, οι οποίοι είναι στο πίσω μέρος της και επικοινωνούν με το SCADA. Το σύστημα προσανατολισμού, όπως και το κιβώτιο ταχυτήτων, διαθέτει δευτερεύον βοηθητικό σύστημα για την ασφαλή λειτουργία του, μέσω του οποίου διασφαλίζεται ότι η περιστροφή της ατράκτου γίνεται με ακρίβεια, χωρίς φθορές και με απόλυτη ασφάλεια. Το βοηθητικό σύστημα διαθέτει αυτόματο σύστημα λίπανσης, το οποίο παρέχει ειδικό γράσο μέσω διανομέων και ηλεκτρικής αντλίας. Ακόμη, διαθέτει ειδικά δοχεία συλλογής του παλιού γράσου, ώστε να μην λερώνεται το εσωτερικό του πύργου και να προστατεύεται το περιβάλλον.
6. Το σύστημα πέδησης, για την ακινητοποίηση της ατράκτου είναι υδραυλικό και αποτελείται από δύο μέρη:
- Τις υδραυλικές δαγκάνες (Passive/Active Braking), οι οποίες κατά την περιστροφή της ατράκτου διατηρούν μια ελαφριά πίεση για να απορροφούνται τυχόν κραδασμοί από ριπές του ανέμου και να προστατευτούν τα γρανάζια των κινητήρων, και
 - Μία μικρή υδραυλική μονάδα (Hydraulic Power Unit) η οποία παρέχει την απαραίτητη υδραυλική πίεση στις δαγκάνες.



Εικόνα 6.6: Σύστημα Αλλαγής Προσανατολισμού

7. Το σύστημα αυτομάτου ελέγχου και αισθητήρων περιλαμβάνει ανεμοδείκτες και τον controller της μονάδας PLC, που δίνει εντολές στο SCADA. Οι ανεμοδείκτες, οι οποίοι ανιχνεύουν τη γωνία του ανέμου σε σχέση με τον άξονα της ανεμογεννήτριας, είναι δύο, για λόγους εφεδρείας. Για να επιτευχθεί η ενεργοποίηση του Yaw System, βάσει των μετρήσεων των ανεμοδεικτών και των σχετικών εντολών από το SCADA, γίνεται με χρήση χρονικών εντολών με σκοπό η ανεμογεννήτρια να μην περιστρέφεται άσκοπα σε κάθε μικρή, στιγμιαία αλλαγή του αέρα. Σημειώνεται ότι, οι κινητήρες αλλαγής περιστροφής της ατράκτου διαθέτουν αυτόνομο σύστημα ψύξης για να αποφεύγεται η υπερθέρμανσή τους σε περιόδους με συχνές αλλαγές κατεύθυνσης του ανέμου. Κάθε κινητήρας διαθέτει θερμικούς αισθητήρες οι οποίες θέτουν τον κινητήρα προσωρινά εκτός λειτουργίας σε περιπτώσεις υπερθέρμανσης.

Ως τεχνολογικό μειονέκτημα της Siemens Gamosa G90 αναφέρεται η όδευση των καλωδίων ισχύος του συστήματος προσανατολισμού. Τα καλώδια ισχύος κατεβαίνουν από το ατρακτίδιο και καταλήγουν προς τη βάση του πυλώνα. Για την προστασία τους από υπερβολικό στρίψιμο υπάρχει σχετικό σύστημα προστασίας που διαθέτει μηχανικούς και επαγωγικούς αισθητήρες μέτρησης μοιρών περιστροφής. Σε περίπτωση που η άτρακτος ξεπεράσει το όριο ασφαλείας των 2,5 με 3 πλήρων περιστροφών (900° - 1080°) τίθεται σε λειτουργία η διαδικασία του αυτόματου ξετυλίγματος. Το μειονέκτημα είναι ότι σε όλη τη διάρκεια της διαδικασίας η ανεμογεννήτρια τίθεται εκτός παραγωγικής λειτουργίας, ήτοι σταματά να παράγει ενέργεια.

6.3 Προδιαγραφές Θεμελίωσης των Α/Γ

Η θεμελίωση μιας ανεμογεννήτριας είναι το πιο κρίσιμο κομμάτι της κατασκευής, καθώς πρέπει να παραλάβει τεράστια στατικά και δυναμικά φορτία, διασφαλίζοντας ότι η κατασκευή δεν θα παρουσιάσει κλίση ή καθίζηση για τουλάχιστον 25-30 χρόνια.

Λόγω του βραχώδους υπόβαθρου στο σημείο εγκατάστασης, χρησιμοποιούνται **κυκλικά πέδιλα** από οπλισμένο σκυρόδεμα για επιφανειακή θεμελίωση (Εικόνες 5.6 και 5.7). Οι επιφανειακές θεμελιώσεις μεταφέρουν τα φορτία της ανωδομής στο έδαφος σε μικρό βάθος, συνήθως πάνω από το φέροντα ορίζοντα. Εδώ, προτιμάται η θεμελίωση βαρύτητας. Γενικά, η διάμετρος κυκλικών πέδινων τους κυμαίνεται μεταξύ 16 με 20 μέτρα και είναι ανάλογη τους ύψους του πυλώνα. Αντίστοιχα, το βάθος εκσκαφής κυμαίνεται από 3 έως 5 μέτρα. Το σχήμα των πέδινων είναι κωνικό, με μεγαλύτερο πάχος στο κέντρο και λεπτότερο στις άκρες, για τη καλύτερη κατανομή τάσεων.

Το υλικό κατασκευής των πέδινων είναι οπλισμένο σκυρόδεμα υψηλής αντοχής, συνήθως κατηγορία **C30/37** ή **C35/45**. Η έγχυση πρέπει να είναι συνεχής για να αποφευχθούν οι ψυχροί αρμοί. Ψυχρός αρμός προκύπτει όταν η διάστρωση του σκυροδέματος διακοπεί για μεγαλύτερο από το πέπον χρονικό διάστημα, με αποτέλεσμα η προηγούμενη στρώση να αρχίζει να στερεοποιείται πριν τη ρίψη της επόμενης στρώσης. Η δημιουργία ψυχρού αρμού προκαλεί μειωμένη αντοχή, λόγω ρωγμών στο σκυρόδεμα και εισροής υγρασίας στο σιδηροπλισμό που προκαλεί διάβρωση.

Ο οπλισμός του είναι χάλυβας κατηγορίας **B500C**.

Μια τυπική βάση περιέχει περίπου 60 με 100 τόνους οπλισμού, με την διάταξή του να βρίσκεται σε πυκνά πλέγματα. Ακόμη, στο κέντρο της θεμελίωσης τοποθετείται ένα σύστημα αγκύρωσης, που είναι ένας χαλύβδινος σε σχήμα κλωβού με εκατοντάδες κοχλίες (bolts) υψηλής αντοχής, πάνω στους οποίους θα βιδωθεί το πρώτο τμήμα του μεταλλικού πυλώνα.

Επειδή η περιοχή του Αντιρρίου έχει ασβεστολιθικά πετρώματα, και λόγω αυτής της μορφολογίας δύναται να παρουσιασθούν κενά στο έδαφος (σπηλαιώσεις), προβλέπεται η διεξαγωγή διασκόπησης κάτω από το σημείο έδρασης. Αν από τα αποτελέσματα της διασκόπησης διαπιστωθεί η ύπαρξη κενών θα εισαχθεί ειδικό μίγμα τσιμέντου υπό πίεση για να γεμίσουν και να ενισχύσει το έδαφος, εξασφαλίζοντας ομοιόμορφη

φέρουσα ικανότητα. Σε κάθε περίπτωση θα προστεθεί μια στρώση σκυροδέματος πριν από το κυρίως μπετόν του πέδιλου.

Η θεμελίωση διαμορφώνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αντέχει σε τρεις τύπους καταπονήσεων:

- Κατακόρυφες δυνάμεις, οι οποίες προέρχονται από το βάρος της ανεμογεννήτριας (πυλώνας, άτρακτος, πτερύγια, κλπ).
- Ροπή ανατροπής που προκαλείται από τις δυνάμεις του ανέμου.
- Δυναμικά φορτία που προκαλούνται από κραδασμούς λόγω της περιστροφής των πτερυγίων.



Εικόνα 6.7: Δημιουργία πυλώνα και τοποθέτηση οπλισμένου σκυροδέματος



Εικόνα 6.8: Ολοκλήρωση σκυροδέματος και δημιουργία πυλώνα ανεμογεννήτριας

6.3.1 Θεμελιακή γείωση

Ο ρόλος της θεμελιακής γείωσης (Εικ. 6.8, 6.9) είναι η σύνδεση της αντικεραυνικής προστασίας Α/Γ με τη γείωση, κατευθύνοντας, μέσω αυτής, κεραυνούς και ηλεκτρολογικά σφάλματα, στη γη.

Αποτελείται από δύο δακτυλίους έναν εσωτερικό και έναν εξωτερικό. Ο εσωτερικός τοποθετείται μέσα στο σκυρόδεμα της βάσης, συνήθως στο κάτω στρώμα του οπλισμού. Αποτελείται από ταινία ή κυκλικό αγωγό επικαλυμμένος από επιψευδαργυρωμένο χάλυβα (ST/tZn). Ο εξωτερικός, τοποθετείται έξω από το μπετόν, κατευθείαν μέσα στο έδαφος, σε απόσταση ενός περίπου μέτρου από τη θεμελίωση. Για την απόληξη στο έδαφος συνήθως χρησιμοποιείται γυμνός χαλκός ή ανοξείδωτος χάλυβας για λόγους αντοχής ως προς την διάβρωση (σκουριά).

Ο αγωγός της γείωσης συνδέεται ηλεκτρικά με τα σίδερα της θεμελίωσης σε τακτά διαστήματα ανά 2 μέτρα. Με αυτόν τον τρόπο, ολόκληρος ο όγκος του οπλισμένου σκυροδέματος λειτουργεί ως ένα τεράστιο ηλεκτρόδιο γείωσης. Αυτό μειώνει δραστικά την ηλεκτρική αντίσταση και βοηθά στη διασπορά των υψηλών ρευμάτων ενός κεραυνού.

Η σύνδεση γίνεται με ειδικούς κοχλιωτούς σφιγκτήρες ή με εξώθερμη συγκόλληση για να διασφαλιστεί ότι η σύνδεση δεν θα χαλαρώσει κατά τη δόνηση του σκυροδέματος.



Εικόνα 6.9: Θεμελιακή γείωση στον πυλώνα της ανεμογεννήτριας

Οι αγωγοί της γείωσης γίνεται βάσει των διεθνών προτύπων IEC 61400-24, το οποίο αφορά την προστασία των ανεμογεννητριών από κεραυνούς και το IEC 62305-3, το

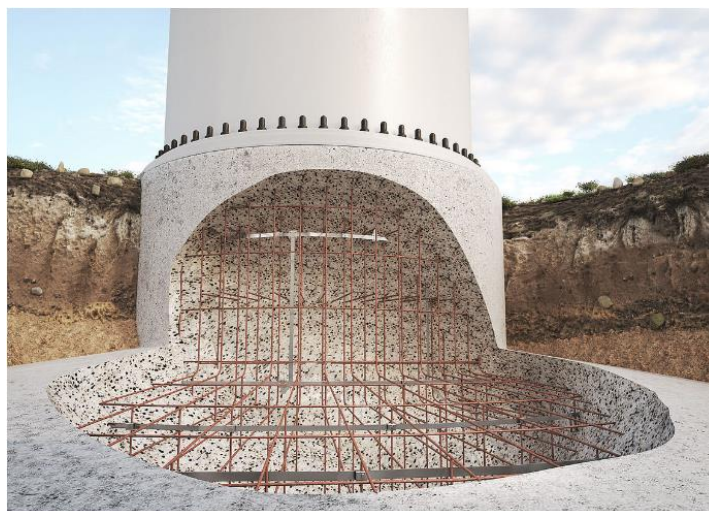
οποίο αφορά την προστασία κατασκευών από κεραυνούς και τη σχεδίαση θεμελιακών γειώσεων.

Για τη γείωση του έργου επιλέγονται χάλκινοι αγωγοί διατομής 95mm^2 . Η επιλογή αυτή εξασφαλίζει:

- Θερμική αντοχή σε περίπτωση κεραυνού, όπου το ρεύμα μπορεί να φτάσει 200kA .
Για αυτή την τάξη έντασης ρεύματος, ο αγωγός πρέπει να διαθέτει ικανή επιφάνεια διατομής, προκειμένου να μην λιώσει από τη στιγμιαία αύξηση της θερμοκρασίας.
- Μηχανική αντοχή στις καταπονήσεις κατά την επίχωση του έργου.

Ο στόχος που τίθεται είναι η αντίσταση γείωσης κάθε Α/Γ να είναι μικρότερη των 10Ω . Δεδομένου ότι το έδαφος στο σημείο εγκατάστασης είναι αρκετά βραχώδες και συνεπώς η αντίστασή του υψηλή, θα προστεθούν επιπλέον αγωγοί που απλώνονται ως ακτίνες μακριά από τη βάση («ακτινικά ηλεκτρόδια»).

Το σύστημα γείωσης εντός του σκυροδέματος συνδέεται με τον πυλώνα μέσω εσωτερικού δακτυλίου που καταλήγει σε αναμονές που συνδέονται με τον μεταλλικό κλωβό αγκύρωσης και με την ειδική μπάρα γείωσης στο εσωτερικό της βάσης του πυλώνα. Με αυτή τη συνδεσμολογία, αν ένας κεραυνός «χτυπήσει» το πτερύγιο, το ρεύμα περνά από τον πυλώνα στις αναμονές και μετά διαχέεται με ασφάλεια σε όλη τη θεμελίωση.



Εικόνα 6.10: Θεμελιακή γείωση σύνδεση με το πυλώνα

6.4 Χωροθέτηση του Αιολικού Πάρκου

Για τη χωροθέτηση των Α/Γ στο πάρκο, εφαρμόζεται η αναφερόμενη στην Παρ. 4.1.3 σχετική μεθοδολογία. Σύμφωνα με αυτή η στοίχιση των Α/Γ σχετίζεται με τους συντελεστές απόστασης μεταξύ σειρών και εντός σειράς D_{cw} και D_{dw} , αντίστοιχα.

Η ελάχιστη πλευρική ορίζεται 2,5 φορές της διαμέτρου του ρότορα και η κατά μήκος απόσταση ορίζεται διπλάσια της πλευρικής. Η επιλογές αυτές γίνονται για να αποφευχθεί το φαινόμενο της σκίασης (Wake effect).

Υπολογισμός συνολικού μήκος κατά σειρά και συνολικού κάθετου μήκος κατά σειρά

Το πλήθος των Α/Γ είναι συνολικά 10. Επιλέγεται να χωροθετηθούν σε 2 σειρές, 5 Α/Γ η καθεμία.

Οι συντελεστές απόστασης είναι:

- $D_{cw} = 4 \cdot D_r = 4 \cdot 90 = 360m$ (πλευρικό)
- $D_{dw} = 7 \cdot D_r = 7 \cdot 90 = 630m$ (κατά μήκος).
- Συνολικό Μήκος Σειράς (D_{row}):

$$D_{row1} = (N_{row1} - 1) \cdot D_{cw} = (5 - 1) \cdot (4 \cdot 90) = 1440m \text{ και}$$

- Συνολική Κάθετη Απόσταση Σειρών (D_{col}):

$$D_{col} = (N_{col} - 1) \cdot D_{dw} = (2 - 1) \cdot (7 \cdot 90) = 630m$$

- Συνολική επιφάνεια (A):

$$A = D_{row} \cdot D_{col} = 1440 \cdot 630 = 907200 m^2 \cong 91 \text{ στρέμματα}$$

Περίφραξη και Ασφάλεια εγκατάστασης

Για την αποφυγή και την διασφάλιση της εγκατάστασης, υπολογίζεται και το συνολικό μήκος της περίφραξης (D_{fence}). Ο υπολογισμός λαμβάνει υπόψη το ύψος της πλήμνης (h_t) και τη διάμετρο του ρότορα. Ουσιαστικά είναι η περίμετρος της εγκατάστασης.

Με δεδομένα ότι το ύψος της πλήμνης είναι 80m και η διάμετρος του ρότορα 90m, η περίμετρος διαμορφώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} D_{fence} &= 2 \cdot (D_{row} + 2h_t + D_r) + 2 \cdot (D_{col} + 2h_t + D_r) \\ &= 2 \cdot (1440 + 160 + 90) + 2 \cdot (630 + 160 + 90) \\ &= 2 \cdot 1690 + 2 \cdot 880 = 3380 + 1760 = 5140m \end{aligned}$$

Συνεπώς, η περίφραξη – περίμετρος είναι 5,14km.

6.5 Οικονομική Αξιολόγηση Έργου

Η οικονομική αξιολόγηση του αιολικού πάρκου θα γίνει με τα εξής κριτήρια:

- Το Κόστος κατασκευής (CAPEX).
- Το Κόστος συντήρησης (OPEX).
- Και την λογιστική απόσβεση.

6.5.1 Κόστος Κατασκευής (CAPEX)

Στο κόστος κατασκευής για το συγκεκριμένο αιολικό πάρκο συμπεριλαμβάνονται η προμήθεια των Α/Γ, η θεμελίωση των Α/Γ και τα λοιπά έργα πολιτικού μηχανικού, οι υποδομές για την ηλεκτρική διασύνδεση, η δημιουργία οδού για την μεταφορά των Α/Γ, τα μεταφορικά και τέλος οι μελέτες, άδειες και τα λοιπά έξοδα που θα χρειαστούν για την ολοκλήρωση της κατασκευής. Τα κόστη CAPEX ανά κατηγορία παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2.

Πίνακας 6.2: Κόστος Κατασκευής (CAPEX)

Κατηγορία Εξόδων	Κόστος ανά Α/Γ (€)	Συνολικό Κόστος (10 Α/Γ)	Ποσοστό επί συνόλου
1. Προμήθεια Ανεμογεννητριών G90	2.000.000 €	20.000.000 €	~70-75%
<i>Περιλαμβάνει: Νασέλα, Πτερύγια, Πύργο, Μετασχηματιστή</i>			
2. Θεμελίωση & Πολιτικά Έργα	240.000 €	2.400.000 €	~8-10%
<i>Περιλαμβάνει: Σκυρόδεμα, Οπλισμό, Εκσκαφές</i>			
3. Ηλεκτρική Διασύνδεση & Υποδομές	200.000 €	2.000.000 €	~7-8%
<i>Περιλαμβάνει: Καλωδιώσεις, Υποσταθμό, SCADA</i>			
4. Οδοποιία & Μεταφορικά	120.000 €	1.200.000 €	~4-5%
<i>Εξαρτάται έντονα από το ορεινό ανάγλυφο της Ναυπακτίας</i>			
5. Μελέτες, Άδειες & Λοιπά Έξοδα	80.000 €	800.000 €	~2-3%
6. Απρόβλεπτα	200.0000 €	2.000.000 €	7%
ΣΥΝΟΛΙΚΟ CAPEX (Αρχική Επένδυση)	2.840.000 €	28.400.000 €	100%

Από τον Πίνακα 5.2 παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο κόστος της επένδυσης είναι η προμήθεια των Α/Γ, η οποία αντιστοιχεί 70 - 75% του κόστους της επένδυσης. Το ποσοστό αυτό συνάδει με τις μελέτες της Wind Europe.

Το κόστος της θεμελίωσης και των λοιπών έργων πολιτικού μηχανικού, στο οποίο συμπεριλαμβάνεται η προμήθεια τους σκυροδέματος και του οπλισμού αντιστοιχεί στο 8 -10% του κόστους της επένδυσης. Το κόστος αυτό συναρτάται ιδιαίτερα από το κόστος του σκυροδέματος και του χάλυβα και δύναται με μια αύξηση των πρώτων υλών, το αντίστοιχο ποσοστό να ανέρθει στο 10-15% του συνόλου. Αύξηση του εν λόγω κόστους είναι πιθανό να συμβεί στην περίπτωση που λόγω της μορφολογίας του υπεδάφους (Κεφ. 6.3) διαπιστωθούν σπηλαιώσεις, όπου θα απαιτηθούν «τσιμεντοενέσεις» ή σκληρά εδάφη, όπου θα απαιτηθούν περισσότερες ώρες εργασίας και ίσως ειδικός εξοπλισμός.

Το κόστος διασύνδεσης με το δίκτυο και οι υποδομές που απαιτούνται για αυτό αντιστοιχεί στο 8 -10% του κόστους της επένδυσης. Πιθανή αύξηση του εν λόγω κόστους μπορεί να προέρθει από την αύξηση του μήκους των καλωδίων που απαιτούνται λόγω δυσκολιών κατά την όδευση ή αύξησης της τιμής του μετάλλου των καλωδίων. Άλλη πιθανή αιτία αύξησης του εν λόγω κόστους είναι οι τυχόν απαιτήσεις του Διαχειριστή ρεύματος (ΑΔΜΗΕ – ΔΕΔΔΗΕ), είτε για έργα ενίσχυσης του υφιστάμενου δικτύου ώστε να ανταπεξέλθει στα 20 MW, είτε για εγκατάσταση προηγμένων συστημάτων προστασίας σταθεροποίησης της τάσης

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ηλεκτρική διασύνδεση δεν επηρεάζει μόνο το κόστος της επένδυσης, αλλά και το χρόνο θέσης σε λειτουργία του έργου. Καθυστερήσεις στην παράδοση των Μ/Σ ή στην έγκριση των μελετών από τον Διαχειριστή προκαλούν απώλεια εσόδων (κόστος χαμένης ευκαιρίας). Το συγκεκριμένο έργο θα ηλεκτροδοτηθεί από υποσταθμό του ΑΔΜΗΕ.

Το κόστος μεταφοράς και οδοποιίας είναι εξίσου σημαντικό. Πρέπει να αντιληφθεί κανείς πως η διαμόρφωση της οδοποιίας εξαρτάται άμεσα από το ορεινό ανάγλυφο της Ναυπακτίας. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι κατά τις εργασίες οδοποιίας μπορεί να υπάρξουν κατολισθήσεις ή κατά τη θεμελίωση σε μεγάλες κλίσεις μπορεί να προκληθεί αστάθεια στο έδαφος. Η ανάγκη για επιπλέον έργα αντιστήριξης, όπως πλέγματα, κλπ θα αυξήσει το κόστος. Πέραν από την οδοποιία, υπέρβαση κόστους μπορεί να προέρθει και από τα μεταφορικά. Ενδεικτικά αναφέρεται η περίπτωση όπου οι δρόμοι πρόσβασης απαιτήσουν συντήρηση ή διαπλάτυνση λόγω των πολύ μεγάλων φορτίων ή των κακών καιρικών.

Τέλος, η κατηγορία κόστους «Μελέτες, Άδειες & Λοιπά Έξοδα», αν και παρουσιάζει το μικρότερο ποσοστό κόστους ($\approx$ 2-3% συνολικού κόστους), είναι εξαιρετικά

ευάλωτη σε αυξήσεις. Αυτό οφείλεται στην Ελληνική γραφειοκρατία και στις νομικές ιδιαιτεροτήτων. Οι λόγοι που μπορεί να το αυξήσουν αυτό το κόστος είναι οι εξής:

1. Δικαστικές Διαμάχες και Πρόσφυγες

Στην Ελλάδα, και ειδικά σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο, όπως η Ναυπακτία, οι προσφυγές στο Συμβούλιο της Επικρατείας από τοπικούς φορείς ή περιβαλλοντικές οργανώσεις είναι πολύ συχνές. Αυτό απαιτεί τις υπηρεσίες εξειδικευμένων δικηγόρων μαζί με πρόσθετες τεχνικές εκθέσεις για την υποστήριξη του έργου, αυξάνοντας τα νομικά έξοδα. Ακόμα και αν η εταιρεία δικαιωθεί, ο χρόνος που χάνεται μεταφράζεται σε οικονομικό κόστος.

2. Πρόσθετες Περιβαλλοντικές Απαιτήσεις

Κατά τη διάρκεια της αδειοδότησης, οι αρχές μπορεί να ζητήσουν πιο εξειδικευμένες μελέτες που δεν είχαν προβλεφθεί αρχικά στο κονδύλι της τάξεως των 800.000€. Μπορεί να ζητηθεί και να επιβληθεί πολυετής παρακολούθηση των πτηνών στην περιοχή, κάτι που απαιτεί συνεχή απασχόληση ειδικών επιστημόνων. Τέλος, ο κίνδυνος ύπαρξης αρχαιολογικών ευρημάτων. Αν κατά τις εκσκαφές βρεθούν αρχαιολογικά ευρήματα, το κόστος των ανασκαφών και η επίβλεψη από την Αρχαιολογική Υπηρεσία επιβαρύνει τον επενδυτή.

3. Παράταση του χρόνου Ανάπτυξης

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει και τα λειτουργικά έξοδα της διαχείρισης του έργου. Σχετίζεται με το χρονοδιάγραμμα, που έχει δοθεί για το έργο, καθώς τη διαδικασία της αδειοδότησης. Αν το έργο καθυστερήσει περισσότερο από το προκαθορισμένο τότε αυτό αυξάνει τον προϋπολογισμό μαζί με τα έξοδα της αδειοδότησης, για τη διατήρηση των εγγυητικών επιστολών, τις αμοιβές συμβούλων και τα ενοίκια των γραφείων να συσσωρεύονται.

4. Κόστος Ασφάλισης και Εγγυήσεων

Τα «λοιπά έξοδα» περιλαμβάνουν την ασφάλιση του έργου κατά τη φύση της κατασκευής. Αυτό σηματοδοτεί πως αν οι διεθνείς αγορές ασφάλισης παρουσιάσουν αστάθεια ή αν το ρίσκο του συγκεκριμένου έργου θεωρηθεί αρκετά υψηλό, τα ασφαλιστρα θα αυξηθούν.

Για να αντιμετωπισθούν τα προαναφερόμενα πιθανά απρόβλεπτα κόστη, έχει ληφθεί υπόψη το ποσό των 2.000.000 €, το οποίο αντιστοιχεί στο 7% του συνολικού κόστους.

6.5.2 Λειτουργικό Κόστος και Κόστος Συντήρησης (OPEX)

Το λειτουργικό κόστος ή κόστος συντήρησης ενός έργου (OPEX) αντιπροσωπεύει τις δαπάνες που γίνονται για να διατηρήσουν τη συνεχή λειτουργία του από την αρχή της λειτουργίας του έως το τέλος του κύκλου ζωής του.

Στο OPEX περιλαμβάνονται οι δαπάνες για την προληπτική και διορθωτική συντήρηση του αιολικού πάρκου, την ομαλή λειτουργία του και την τηλεπαρακολούθηση του σε καθημερινή βάση, την ασφάλιση από φυσικές καταστροφές, τις βλάβες και τις απώλειες εσόδων, τα ανταποδοτικά τέλη, τα οποία είναι το 3% των εσόδων, την ενοικίαση γης πληρώνοντας σε ιδιώτες ή τα τέλη χρήσης της δασικής έκτασης, τα διοικητικά και τα λογιστικά έξοδα, στα οποία περιλαμβάνονται η νομική υποστήριξη, η φύλαξη του πάρκου και τα λοιπά λογιστικά έξοδα, και τέλος, περιλαμβάνονται οι φόροι και άλλα λοιπά έξοδα, στα οποία συμπεριλαμβάνονται ο ΕΝΦΙΑ, τα δημοτικά τέλη και οι συνδρομές φορέων. Όλα τα έξοδα που προαναφέρθηκαν παρουσιάζονται και στον Πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3: Ετήσιο λειτουργικό κόστος έργου

Κατηγορία Εξόδων	Κόστος ανά Α/Γ (€/έτος)	Συνολικό Ετήσιο Κόστος (10 Α/Γ)	Επεξήγηση
Προληπτική & Διορθωτική Συντήρηση	35.000 €	350.000 €	Τακτικοί έλεγχοι, ανταλλακτικά, λάδια, αναλώσιμα.
Λειτουργία & Τηλεπαρακολούθηση	5.000 €	50.000 €	24/7 παρακολούθηση μέσω SCADA και διαχείριση ενέργειας.
Ασφάλιση (All Risk & Business Interruption)	8.000 €	80.000 €	Κάλυψη για φυσικές καταστροφές, βλάβες και απώλεια εσόδων.
Ανταποδοτικά Τέλη (3% επί των εσόδων)	~12.000 €	120.000 €	Υποχρεωτική απόδοση σε Δήμο, κατοίκους και Πράσινο Ταμείο.
Ενοίκια Γης / Δασικά Τέλη	4.000 €	40.000 €	Πληρωμή σε ιδιώτες ή τέλη χρήσης δασικής έκτασης.
Διοικητικά & Λογιστικά Έξοδα	3.000 €	30.000 €	Νομική υποστήριξη, λογιστικά, φύλαξη πάρκου.
Φόροι & Λοιπά Τέλη	5.000 €	50.000 €	ΕΝΦΙΑ, δημοτικά τέλη, συνδρομές φορέων.

Κατηγορία Εξόδων	Κόστος ανά Α/Γ (€/έτος)	Συνολικό Ετήσιο Κόστος (10 Α/Γ)	Επεξήγηση
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΕΤΗΣΙΟ ΟΡΕΧ	72.000 €	720.000 €	

Παρατηρώντας τον Πίνακα 5.3 προκύπτει ότι η προληπτική και διορθωτική συντήρηση είναι το πιο μεγάλο κόστος για την συντήρηση του και ακολουθούν τα ανταποδοτικά τέλη.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι, όπως στο κόστος κατασκευής, έτσι και στα λειτουργικά κόστη, μπορεί να υπάρξουν πρόσθετες επιβαρύνσεις.

Πιθανή επιβάρυνση μπορεί να προέρθει από την αύξηση του κόστους της προληπτικής και διορθωτικής συντήρησης, μιας και αυτό βαίνει αυξανόμενο με το πέρασμα του χρόνου, λόγω γήρανσης του εξοπλισμού, με ρυθμό που είναι δύσκολο να προβλεφθεί με ακρίβεια. Μετά από τα 10-12 έτη λειτουργίας, τα μηχανικά μέρη παρουσιάζουν φθορές που απαιτούν ακριβά ανταλλακτικά. Στο κόστος συντήρησης είναι και το κόστος των πετυγίων. Αν χρειαστεί αλλαγή, το κόστος μίσθωσης ενός ειδικού γερανού, που μπορεί να φτάσει σε ορεινό ανάγλυφο είναι τεράστιο και οι τιμές αυτών των υπηρεσιών ανεβαίνουν συνεχώς. Όλα αυτά μαζί επηρεάζονται άμεσα από τον πληθωρισμό της χώρας.

Άλλη αύξηση που μπορεί να παρουσιαστεί είναι στη δαπάνη ασφάλισης του αιολικού πάρκου. Η αύξηση αυτή οφείλεται σε δύο παράγοντες. Ο 1ος παράγοντας είναι η κλιματική αλλαγή, η οποία προκαλεί την αύξηση των ακραίων καιρικών συνθηκών καθώς και αύξηση του κίνδυνος εκδήλωσης πυρκαγιάς γύρω από το δασικό ανάγλυφο της ορεινής Ναυπακτίας. Ο 2ος παράγοντας σχετίζεται με το ιστορικό των βλαβών. Αν το πάρκο παρουσιάζει συχνές ζημιές, η ασφαλιστική θα θεωρήσει την επένδυση υψηλού ρίσκου και αυξήσει το κόστους ασφάλισης.

Τέλος, πιθανή πρόσθετη επιβάρυνση μπορεί να προέρθει από πιθανή αναπροσαρμογή των ανταποδοτικών τελών ή των ενοικίων δασικής έκτασης. Το συμβόλαιο μίσθωσης με ιδιώτες ή το δημόσιο περιλαμβάνουν σχεδόν πάντα ρήτρα αναπροσαρμογής βάσει του Δείκτη Τιμών Καταναλωτή. Οπότε, αν ανεβαίνει το κόστος ζωής, ανεβαίνει και το ενοίκιο της δασικής έκτασης.

6.5.3 Αναμενόμενα έσοδα της επένδυσης

Η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του αιολικού πάρκου σχετίζεται άμεσα με τη μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου.

Για τις συνθήκες του σημείου εγκατάστασης, λόγω του ορεινού ανάγλυφου, λαμβάνεται μέση ταχύτητα του ανέμου 5,5 m/sec.

Πίνακας 6.4: Ετήσια Παραγωγή G90 σε σχέση με τη μέση ταχύτητα του ανέμου $V_{ave}(m/s)$

P(MWh)		Vave(m/s)					
		5	6	7	8	9	10
Weibull k	1,5	3058	4388	5635	6716	7596	8269
	2	2534	4026	5576	7039	8331	9406

Από τον Πίνακα 6.4, η μέση ταχύτητα ανέμου βρίσκεται μεταξύ των τιμών 5 και 6 m/sec, στις οποίες αντιστοιχούν τιμές παραγωγής ενέργειας 3058 και 4388 MWh, αντίστοιχα για τιμή της παραμέτρου k της **Weibull** ίση με 1,5. Η τιμή k=1,5, αντιστοιχεί στις συνθήκες μεγάλης διακύμανσης της ταχύτητας του ανέμου που επικρατούν στο σημείο εγκατάστασης, δηλαδή πολλές ώρες της ημέρας πνέουν πολύ ασθενείς άνεμοι και αρκετές ώρες πολύ ισχυρές ριπές.

Με γραμμική παρεμβολή προκύπτει ότι μέση ταχύτητα του ανέμου 5,5 m/sec αντιστοιχεί παραγωγή ενέργειας 3723 MWh ανά ανεμογεννήτρια.

Λαμβάνοντας υπόψη τα οριζόμενα στον Ν.4416/2016 και την ισχύουσα Υπουργική Απόφαση (ΦΕΚ Β'2710/2024), που καθορίζει τις Τιμές Αναφοράς για κάθε έτος, υιοθετούμε τιμή MWh τα 80€.

Βάσει των ανωτέρω τα ετήσια έσοδα προκύπτουν $3.723 * 80 = 297.840$ € ανά Α/Γ και $29.7840 * 10 = 2.978.400$ € για το σύνολο του αιολικού πάρκου.

6.5.4 Υπολογισμός καθαρού εσόδου της επένδυσης

Αφαιρώντας από τα ετήσια έσοδα παραγωγής το ετήσιο κόστος συντήρησης προκύπτει ότι το Ετήσιο καθαρό κέρδος προ φόρων της επένδυσης είναι:

$$\begin{aligned}\text{Ετήσιο Καθαρό κέρδος προ φόρων} &= \text{Κέρδος παραγωγής} - \text{Κόστος Συντήρησης} \\ &= 2.978.400 - 720.000 = 2.258.400 \text{ €/ανά έτος}\end{aligned}$$

Θεωρώντας ότι ο εξοπλισμός της επένδυσης αποσβένει ακολουθώντας τη μέθοδο της σταθερής απόσβεσης, ο κύκλος ζωής της είναι 20 έτη και στο τέλος αυτού η υπολειμματική αξία της επένδυσης είναι μηδενική, προκύπτει ότι η ετήσια απόσβεση είναι:

$$\begin{aligned} \text{Ετήσια Απόσβεση} &= \frac{\text{Συνολικό Κόστος} - \text{Υπολειμματική Αξία}}{\text{Κύκλος Ζωής}} \\ &= \frac{28.400.000 - 0}{20} = 1.420.000 \text{ €/έτος} \end{aligned}$$

Βάσει των ανωτέρω το φορολογητέο εισόδημα προκύπτει:

$$\begin{aligned} \text{Φορολογητέο εισόδημα} &= \text{Ετήσιο Λειτουργικό Κέρδος} - \text{Ετήσια Απόσβεση} \\ &= 2.258.400 - 1.420.000 = 838.400 \text{ €/έτος} \end{aligned}$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο φόρος κέρδους επιχείρησης είναι 22%, προκύπτει ότι ο ετήσιος φόρος είναι

$$\text{Φόρος} = \text{Φορολογητέο Εισόδημα} * 22\% = 838.400 * 0,22 = 184.448 \text{ €}$$

και το ετήσιο καθαρό έσοδο μετά φόρων:

$$\begin{aligned} \text{Ετήσιο Καθαρό έσοδο μετά φόρων} &= \text{Ετήσιο Καθαρό έσοδο προ φόρων} - \\ &\text{Ετήσιος Φόρος} = 2.258.400 - 184.448 = 2.073.952 \text{ €/έτος} \end{aligned}$$

6.5.5 Οικονομική αποτίμηση της επένδυσης

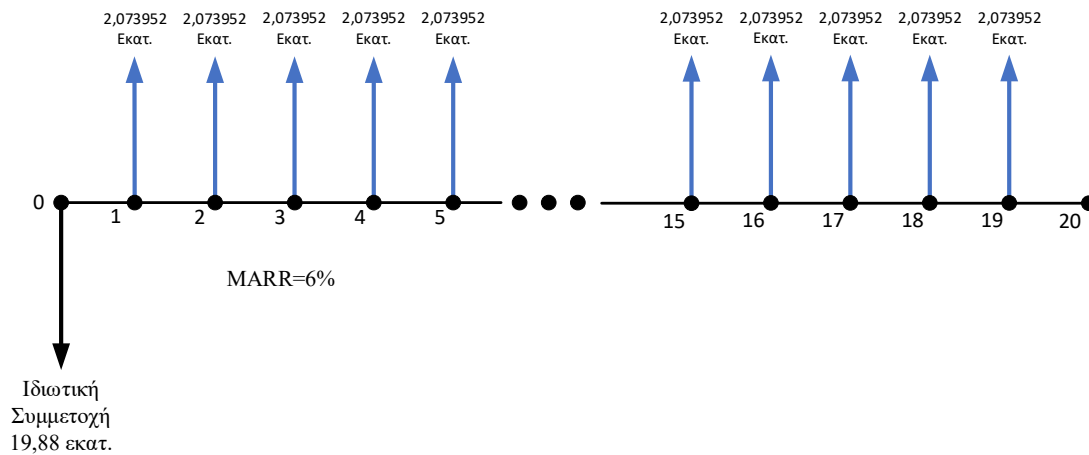
Για την οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης λαμβάνεται υπόψη ότι ισχύει ευνοϊκό καθεστώς επιχορήγησης επενδύσεων ανάπτυξης αιολικών πάρκων από την Ευρωπαϊκή Ένωση με ποσοστό επιχορήγησης με ποσοστά που κυμαίνονται από 20 έως 30% του CAPEX, ανάλογα με τις προϋποθέσεις που ικανοποιεί η επένδυση. Στην παρούσα ανάλυση υιοθετείται το πιο ευνοϊκό σενάριο 30% του CAPEX.

Περαιτέρω, λαμβάνοντας υπόψη όσα παρουσιάστηκαν στην Παρ. 4.4, για την παρούσα ανάλυση υιοθετείται ελάχιστος αποδεκτός εσωτερικός ρυθμός απόδοσης MARR = 6%.

Βάσει των ανωτέρω και των οικονομικών δεδομένων της επένδυσης που παρουσιάστηκαν στις Παρ. 6.5.1 έως 6.5.4, τα οικονομικά δεδομένα της επένδυσης συνοψίζονται ως εξής:

- Ελάχιστος αποδεκτός εσωτερικός ρυθμός απόδοσης MARR = 6%
- Διάρκεια κύκλου ζωής επένδυσης N = έτη
- Συνολικό Κόστος Κατασκευής : 28.400.000 €
- Ιδιωτική Συμμετοχή (70%): $28.400.000 \times 0,7 = 19.880.000 \text{ €}$
- Ετήσια καθαρά έσοδα μετά φόρων EE = 2.073.952 €

Η χρηματορροή της επένδυσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1



Σχήμα 6.1: Διάγραμμα Ταμειακής Ροής Αιολικού Πάρκου

Από την χρηματοροή της επένδυσης προκύπτει ότι η παρούσα αξία των εσόδων είναι:

$$PV_{EE} = EE \frac{(1 + MARR)^n - 1}{MARR * (1 + MARR)} = 2.073.952 * \frac{1,06^{20} - 1}{0,06 * (1,06)}$$

$$= 2.073.952 * 11,47 = 23.788.229 \text{ €}$$

και συνεπώς, η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης είναι:

$$NPV = PV_{EE} - \text{Ιδιωτική Συμμετοχή} = 23.788.229 - 19.880.000 = 3.908.229 \text{ €}$$

Από τους παραπάνω υπολογισμούς προέκυψε ότι η επένδυση έχει θετική παρούσα αξία, και συνεπώς αποδίδει περισσότερο από τον ελάχιστο αποδεκτό εσωτερικό απόδοσης που υιοθετήθηκε MARR=6%.

Σημειώνεται ότι για το λιγότερο ευνοϊκό σενάριο, αυτό της επιχορήγησής με 20%, η επένδυση εξακολουθεί να είναι συμφέρουσα (NPV = 1068229 €). Σε αντίθεση, εάν δεν υπήρχε η επιχορήγηση, η επένδυση θα απαιτούσε πολύ μεγαλύτερη ιδιωτική κεφαλαιακή δέσμευση (28.400.000 €), μειώνοντας σημαντικά την αποδοτικότητά της, αλλά θα παρέμενε οριακά συμφέρουσα για το MARR=6% καθώς το IRR χωρίς επιχορήγηση διαμορφώνεται περίπου στο 3,7% (άρα για MARR=0% είναι σαφώς συμφέρουσα).

Ο εσωτερικός ρυθμός απόδοσης της επένδυσης για τα δύο ακραία σενάρια επιχορήγησης 30% και 20%, προκύπτει 8% και 6,75%, αντίστοιχα.

6.6 Θεσμικό Πλαίσιο, Περιβαλλοντική Κατάταξη και Δεσμεύσεις Έργου

Το προτεινόμενο Αιολικό Πάρκο ισχύος 20 MW στο Μολύκρειο υπάγεται στην Ομάδα 10 («Έργα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας») και κατατάσσεται σταθερά στην Υποκατηγορία Α2 (βάσει της ΥΑ ΔΠΠΑ/οικ. 37674/2016, όπως τροποποιήθηκε και ισχύει). Με την ονομαστική ισχύ των 20MW κατατάσσει το έργο στην ενδιάμεση ζώνη της Κατηγορίας Α. Συγκεκριμένα, βρίσκεται κάτω από το γενικό όριο των 50 MW (το οποίο ορίζει την Κατηγορία Α1), αλλά και άνω του ορίου των 5 MW που αφορά τα μικρά έργα της Κατηγορίας Β. Ακόμη και στην περίπτωση που μέρος του έργου χωροθετηθεί εντός προστατευόμενης ζώνης (π.χ. περιοχή δικτύου Natura 2000), με τα ισχύοντα νομοθετικά δεδομένα το κατώφλι για την υπαγωγή στην Κατηγορία Α1 διαμορφώνεται στα 35 MW. Επομένως, το έργο των 20 MW παραμένει στην Υποκατηγορία Α2 σε κάθε περίπτωση.

Λόγω της κατάταξής του στην Υποκατηγορία Α2, η αξιολόγηση της Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ) και η έκδοση της Απόφασης Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΑΕΠΟ) εμπίπτει στην αρμοδιότητα της Γενικής Διεύθυνσης Χωροταξικής & Περιβαλλοντικής Πολιτικής της Αποκεντρωμένης Διοίκησης Πελοποννήσου, Δυτικής Ελλάδος και Ιονίου.

Η διαδικασία αδειοδότησης εκσυγχρονίζεται και διέπεται από τις εξής τρέχουσες διατάξεις:

- Ν. 4685/2020 (Εκσυγχρονισμός Περιβαλλοντικής Νομοθεσίας): Η υποβολή της ΜΠΕ γίνεται υποχρεωτικά σε ηλεκτρονική μορφή μέσω του Ηλεκτρονικού Περιβαλλοντικού Μητρώου (ΗΠΜ). Οι γνωμοδοτήσεις των φορέων και η έκδοση της ΑΕΠΟ διεκπεραιώνονται ψηφιακά εντός αυστηρών, δεσμευτικών προθεσμιών.
- Ν. 4951/2022 & Ν. 5037/2023: Ρυθμίζουν την απλοποιημένη έκδοση των αδειών εγκατάστασης και λειτουργίας, καθώς και τη λήψη της Βεβαίωσης Παραγωγού από τη Ρυθμιστική Αρχή Αποβλήτων, Ενέργειας και Υδάτων (ΡΑΑΕΥ).

Η εκδοθείσα ΑΕΠΟ θα έχει διάρκεια ισχύος δεκαπέντε (15) ετών και θα αποτελεί τον δεσμευτικό οδηγό για τη φάση κατασκευής και λειτουργίας του σταθμού. Σε περίπτωση τεχνικών ασυμβατοτήτων ή ανάγκης τροποποίησης του σχεδιασμού, ο φορέας υποχρεούται να υποβάλει φάκελο τροποποίησης/ανανέωσης στο ΗΠΜ προς έγκριση από την αρμόδια Αποκεντρωμένη Διοίκηση.

Επειδή το έργο χαρακτηρίζεται ως επένδυση με σημαντικές επιπτώσεις για το περιβάλλον, η κύρια ΜΠΕ συνοδεύεται υποχρεωτικά από τις ακόλουθες επιστημονικές μελέτες:

- Μια Ειδική Οικολογική Αξιολόγηση (ΕΟΑ), βάσει της ΚΥΑ 37338/1807/2010 (Καθορισμός μέτρων και διαδικασιών για τη διατήρηση της άγριας ορνιθοπανίδας και των ενδιαιτημάτων/βιοτόπων της, σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της Οδηγίας 79/409/ΕΟΚ...), διενεργείται λεπτομερής μελέτη για την άγρια ορνιθοπανίδα και τα μεταναστευτικά περάσματα στην περιοχή του Μολυκρείου.
- Σε απόλυτη συμμόρφωση με τον Εθνικό Κλιματικό Νόμο (Ν. 4936/2022), ενσωματώνεται ειδικό κεφάλαιο ποσοτικοποίησης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Scope 1 & Scope 2). Η μελέτη υπολογίζει το CO₂ που θα εκλυθεί κατά τη φάση κατασκευής (χρήση μηχανημάτων έργου, εκσκαφές, παραγωγή και μεταφορά σκυροδέματος για τις βάσεις θεμελίωσης των 10 Α/Γ). Παράλληλα, αποδεικνύει υπολογιστικά τον ακριβή χρόνο (σε μήνες λειτουργίας) που απαιτείται ώστε το αιολικό πάρκο να «αποσβέσει» κλιματικά αυτό το αποτύπωμα, παράγοντας πλέον καθαρή, πράσινη ενέργεια.
- Επιπλέον, για τη ΜΠΕ θα πρέπει να συμπεριληφθούν μελέτες του αεροδυναμικού θορύβου & του Φαινόμενου Σκίασης. Για το θόρυβο πραγματοποιείται ψηφιακή ακουστική προσομοίωση της λειτουργίας των πτερυγίων, ώστε να διασφαλίζεται ότι ο παραγόμενος θόρυβος δεν θα ξεπερνά το νόμιμο όριο των 45dB στους πλησιέστερους οικισμούς. Όσον αφορά το φαινόμενο σκίασης εξετάζεται η συχνότητα εναλλαγής σκιάς/φωτός από την περιστροφή των πτερυγίων μπροστά από τον ήλιο, με σκοπό τον σχεδιασμό κατάλληλων αποστάσεων ή περιόδων παύσης ώστε να μην προκαλείται οπτική όχληση σε κοντινές κατοικίες.
- Τέλος, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί και μελέτη διαχείρισης εδάφους και ανακύκλωσης. Σύμφωνα με τον Ν.4819/2021 (Πλαίσιο Ανακύκλωσης), η μελέτη αναφέρει αναλυτικά τη διαχείριση των προϊόντων εκσκαφών και των στερεών αποβλήτων. Τα πλεονάζοντα υλικά εδάφους θα χρησιμοποιηθούν για την τελική διαμόρφωση και φυτοτεχνική αποκατάσταση των πρανών με αυτόχθονη βλάστηση. Τα επικίνδυνα απόβλητα της λειτουργίας (χρησιμοποιημένα ορυκτέλαια των Α/Γ) θα διαχειρίζονται μέσω εγκεκριμένων Συστημάτων Εναλλακτικής Διαχείρισης (Π.Δ. 82/2004), ενώ προβλέπεται μέριμνα για τη μελλοντική ανακύκλωση των composite υλικών των πτερυγίων μετά την τελική αποξήλωση του σταθμού.

Αφότου ολοκληρωθεί ο φάκελος της ΜΠΕ και οι υπόλοιπες μελέτες διαβιβάζονται ψηφιακά μέσω της πλατφόρμας του Υπουργείου Περιβάλλοντος Ενέργειας (ΥΠΙΕΝ) για δεσμευτική γνωμοδότηση στους εκάστοτε φορείς:

1. Στη διεύθυνση δασών Αιτωλοακαρνανίας και στο Δασαρχείο Ναύπακτου (για την αυτόματη ενσωμάτωση της Έγκρισης Επέμβασης στην ΑΕΠΟ).
2. Στην Εφορεία Αρχαιοτήτων Αιτωλοακαρνανίας & Λευκάδας (βάσει Υπουργείου Πολιτισμού – Ν.3028/2002).
3. Στην Γενικό Επιτελείο Εθνικής Άμυνας (ΓΕΕΘΑ) και συγκεκριμένα στη Διεύθυνση Υποδομής (έλεγχος ζωνών ραντάρ και εθνικής άμυνας).
4. Στην Αρχή Πολιτικής Αεροπορίας (ΑΠΑ) είναι ο αρμόδιος ρυθμιστικός φορέας για τον έλεγχο ασφάλειας αεροναυτιλίας και τεχνικών εμποδίων.
5. Τέλος, στην Ρυθμιστική Αρχή Αποβλήτων, Ενέργειας και Υδάτων (ΡΑΑΕΥ) η πρώην Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ).

Συμπεράσματα

Με την ανάπτυξη και την ενσωμάτωση των αιολικών πάρκων στην Ελλάδα και πιο συγκεκριμένα στο Αντίρριο αποτελεί σπουδαία στρατηγική για την εγκατάσταση περισσότερων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που θα είναι πιο καθαρές ως προς το περιβάλλον και θα βοηθήσουν στην ενεργειακή ανάπτυξη και αυτονομία της χώρας.

Παρ' όλα αυτά για να πραγματοποιηθεί αυτή η διαδικασία θα πρέπει να υπάρξουν βελτιώσεις ως προς το οικονομικό, το περιβαλλοντικό, το κοινωνικό και το τεχνολογικό επίπεδο.

Για να είναι ένα αιολικό πάρκο οικονομικά βιώσιμο και άκρως αποδοτικό, δεν αρκεί απλώς να φυσάει αλλά χρειάζεται και έξυπνη διαχείριση. Η διαχείριση αυτή επιτυγχάνεται με τρεις βασικούς παράγοντες. Πρώτος και ίσως ο πιο σημαντικός είναι η αναβάθμιση (repowering) με το πέρας του κύκλου ζωής του έργου αντί να κατασκευαστεί νέο πάρκο από το μηδέν, θα γίνεται μονάχα η αντικατάσταση των παλιών Α/Γ με νέες, μεγαλύτερες σε ισχύος και πιο αποδοτικές φέρνοντας περισσότερο κέρδος και λειτουργώντας στην ίδια ονομαστική ισχύ. Με αυτό το τρόπο θα παράγεται περισσότερο ρεύμα με λιγότερες ανεμογεννήτριες και θα αξιοποιηθούν οι ήδη υπάρχουσες υποδομές. Στην οικονομική βιωσιμότητα του έργου μπορεί να βοηθήσει και η πρόοδος της τεχνολογίας και αυτό επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Η αιολική ενέργεια εξαρτάται με τις καιρικές συνθήκες. Η σύνδεση του πάρκου με μεγάλες συστοιχίες συσσωρευτών θα επιτρέπουν την αποθήκευση της ενέργειας όταν η ζήτηση είναι χαμηλή και την πώλησή της στο δίκτυο όταν οι τιμές κορυφώνονται. Παράλληλα, η ενσωμάτωση αυτοματοποιημένων συστημάτων ελέγχου επιτρέπει την πρόβλεψη και πρόληψη βλαβών πριν από την εκδήλωσή τους (προληπτική συντήρηση). Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται σημαντική μείωση τόσο του κόστους επισκευής όσο και του χρόνου εκτός λειτουργίας (downtime) της εγκατάστασης, διασφαλίζοντας τη σταθερότητα των εσόδων.

Από περιβαλλοντικής πλευράς θα πρέπει αυτού του είδους ΑΠΕ να αποτελεί μια καθαρή μορφή πράσινης ενέργειας σε όλα τα στάδια. Για να γίνει αυτή η βιώσιμη διαχείριση θα πρέπει να γίνεται χρήση προηγμένων λογισμικών συστημάτων για την τοποθέτηση και χωροθέτηση των ανεμογεννητριών με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται η οπτική και η ακουστική όχληση, αλλά και η επίδραση στο τοπικό μικρόκλιμα, χωρίς να χάνεται η αεροδυναμική απόδοση. Να υπάρχουν συστήματα ραντάρ τα οποία να λειτουργούν για την προστασία της πανίδας και όταν εντοπίζουν

πουλιά, που πλησιάζουν προς το πάρκο τότε το ραντάρ να δίνει την εντολή να επιβραδύνει ή να σταματά αυτόματα τις τουρμπίνες μέχρι να απομακρυνθούν από την Α/Γ. Επίσης, ένας άλλος τρόπος είναι με τη βαφή των πτερυγίων με μαύρο ή σκούρο χρώμα αυξάνοντας την ορατότητα της ανεμογεννήτριας για τα πουλιά και μειώνοντας τις συγκρούσεις. Ένας βέλτιστος τρόπος για την περιβαλλοντική υπόσταση που θα πρέπει να έχει το έργο είναι η ανακύκλωση των πτερυγίων. Τα πτερύγια είναι φτιαγμένα από fiberglass που είναι δύσκολο να ανακυκλωθεί. Σήμερα, η βιομηχανία στρέφεται σε ανακυκλώσιμες ρητίνες και λοιπά υλικά, επιτρέποντας την πλήρη αποσυναρμολόγηση και επαναχρησιμοποίηση των υλικών στο τέλος του κύκλου ζωής του έργου.

Για να πραγματοποιηθούν όλα όσα αναφέρθηκαν είναι απαραίτητο η εμπλοκή της εκάστοτε τοπικής κοινωνίας. Είναι σημαντικός παράγοντας γιατί κανένα έργο δεν προχωρά άμεσα και αποδοτικά χωρίς την υποστήριξη των πολιτών μέσω ανταποδοτικών οφελών ή ενεργειακών κοινοτήτων. Χάρης αυτού δίνεται η δυνατότητα στον πολίτη να αντιληφθεί τη σπουδαιότητα και το ρόλο του αιολικού πάρκου που θα έχει ως σκοπό την παραγωγή ενέργειας από το περιβάλλον και τη μείωση κόστους του ρεύματος.

Τελειώνοντας είναι αντιληπτό πως η εξέλιξη της τεχνολογίας είναι σημαντική για την βελτίωση των αιολικών πάρκων τόσο στις αδειοδοτήσεις όσο σε οικονομικό και περιβαλλοντικό επίπεδο. Καθώς, η ενσυναίσθηση και η συμμετοχή των τοπικών κοινοτήτων για το ξεκίνημα νέων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα βοηθήσει στην ανάδειξη του τόπου. Οι δύο στόχοι ταυτίζονται. Διότι οι πιο κερδοφόρες ανεμογεννήτριες είναι αυτές που λειτουργούν έξυπνα, σέβονται το οικοσύστημα και έχουν την τοπική κοινωνία με το μέρος τους.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- **Αρβανίτη, Γ. & Κουμαντάς, Κ. (2025).** Αιολικά Πάρκα: Επιπτώσεις, Προκλήσεις και Προοπτικές. Η Μελέτη Περίπτωσης της Κρήτης. Διπλωματική Εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.
- **Συλλογικό Έργο (χ.χ.).** Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις Συστημάτων Α.Π.Ε. [Εκπαιδευτικό Υλικό].
- **Günay, B., et al. (2024).** "Life Cycle Environmental Impacts of Wind Turbines: A Path to Sustainability." *Sustainability*, MDPI, 16(13), 5365.
- **Kończak, K. (2024).** Environmental impact of wind farms from a biodiversity perspective: A comparative study of terrestrial and marine wind farms. Master's Thesis, University of Gävle.
- **IUCN (2021).** Μετριασμός Επιπτώσεων στη Βιοποικιλότητα κατά την Ανάπτυξη Έργων Αιολικής και Ηλιακής Ενέργειας: Οδηγός για Σχεδιαστές και Προγραμματιστές. Διεθνής Ένωση Προστασίας της Φύσης.
- **Schoning, M. & Odeberg, J. (2023).** LCA-Compatible Biodiversity Assessment Methods for Wind Power Production. Independent Thesis, KTH Royal Institute of Technology.
- **Wood Mackenzie (2021).** Social and Environmental Impact Study of Offshore Wind in Greece. Report for ELIAMEP.
- **Gorayeb, A., et al. (2020).** "Social Participation and Energy Justice in Wind Power Deployment." *Energy Policy*, 144, 111690.
- **Hirt, L. & Sahli, B. (2022).** "The Impact of Wind Turbines on House Prices: A Meta-Analysis." *Journal of Environmental Economics and Management*, 112, 102632.
- **Llera, E. M., et al. (2021).** "Economic and Social Evaluation of Wind Energy: A Life Cycle Perspective." *Renewable Energy*, 178, 450-465.
- **Wolsink, M. (2020).** "Wind power and the social-environmental framework." *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 35, 477-485.
- **Νόμος 4685/2020 (ΦΕΚ Α' 92/07.05.2020).** Εκσυγχρονισμός περιβαλλοντικής νομοθεσίας, ενσωμάτωση στην ελληνική νομοθεσία των Οδηγιών 2018/844 και 2019/692.

- Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις ΑΠΕ (ΦΕΚ 2464/Β/2008).
- **Papadopoulou, M. P., et al. (2022).** "Strategic Environmental Assessment in Wind Power Planning: Methodological Challenges." *Environmental Management Journal*.
- **Hellenic Republic.** *Special Spatial Planning Framework for RES (FEK 2464/B/2008)*.
- **Law 4685/2020 (FEK A 92/2020).** *Modernization of Environmental Legislation*.
- **Kati, V., et al. (2021).** "The biodiversity-wind energy-land use nexus in a global biodiversity hotspot." *Biological Conservation*.
- **United Nations (2015).** *Sustainable Development Goals (SDGs) - Goal 7: Affordable and Clean Energy*.
- https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Jul/IRENA_TEC_RPGC_in_2024_2025.pdf
- Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ). (2026, 21 Ιανουαρίου). *Η Στατιστική της Αιολικής Ενέργειας στην Ελλάδα για το 2025*. <https://eletaen.gr/d-t-statistiki-aiolikis-energeias-2025/>
- IEA (International Energy Agency) World Energy Outlook 2025) <https://iea.blob.core.windows.net/assets/9753df19-0a71-422a-b725-012c555763b3/WorldEnergyOutlook2025.pdf>
- <https://wwindea.org/GlobalStatistics>
- **Russell Mckenna, Johan Lilliestam, Heidi Ursula Heinrichs, Jann Michael Weinand, Johannes Schmidt, Iain Staffell, Andrea N. Hahmann, Peter Burgeherr, Arne Burdack, Monika Bucha, Ruihong Chen, Michael Klingler, Paul Lehmann, Jens Lowitzsch, Riccardo Novo, James Price, Romain Sacchi, Patrick Scherhauser, Eva Maria Scholl, Piero Visconti, Paola Velasco – Herrejó, Marianne Zeyringer & Luis Ramirez Camargo (2025).** "System impacts of wind energy developments: Key research challenges and opportunities"

[https://www.dora.lib4ri.ch/psi/dload/psi:68665/PDF/McKenna-2025-System_impacts_of_wind_energy_developments-\(published_version\).pdf](https://www.dora.lib4ri.ch/psi/dload/psi:68665/PDF/McKenna-2025-System_impacts_of_wind_energy_developments-(published_version).pdf)

- Μιχαήλ Α. Τσέβας (2018). Θεμελίωση Ανεμογεννητριών και Δυναμική Αλληλεπίδραση των Πυλώνων με το Έδαφος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
<https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/47623/%CE%9C%CE%B5%CF%84%CE%B1%CF%80%CF%84%CF%85%CF%87%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%AE%20%CE%B5%CF%81%CE%B3%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%B1%20-%20%CE%A4%CF%83%CE%B5%CE%B2%CE%AC%CF%82%20%CE%9C%CE%B9%CF%87%CE%AC%CE%BB%CE%B7%CF%82%20-%20%CF%84%CE%B5%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CF%8C.pdf?sequence=1>
- <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/763-gamesa-g90>
- <https://www.dapeep.gr/eta-03-2026/>
- ΝΟΜΟΣ ΥΠ' ΑΡΙΘΜ. 4414 ΦΕΚ Α' 149/09.08.2016
https://helapco.gr/pdf/N_4414_2016.pdf
- ΝΟΜΟΣ ΥΠ' ΑΡΙΘ. 4014 ΦΕΚ Α' 209/21.9.2011 Περιβαλλοντική Αδειοδότηση έργων και δραστηριοτήτων
<https://www.kodiko.gr/nomothesia/document/62759/nomos-4014-2011>
- ΝΟΜΟΣ ΥΠ' ΑΡΙΘ. 4685 ΦΕΚ Α 92/7.5.2020 Εκσυγχρονισμός Περιβαλλοντικής Νομοθεσίας (Τροποποιήσεις του ν. 4014/2011)
<https://www.kodiko.gr/nomothesia/document/618405/nomos-4685-2020>
- ΝΟΜΟΣ ΥΠ' ΑΡΙΘΜ. 4936 ΦΕΚ Α 105/27.5.2022 Εθνικός Κλιματικός Νόμος Μετάβαση στην κλιματική ουδετερότητα και προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή, επείγουσες διατάξεις για την αντιμετώπιση της ενεργειακής κρίσης και την προστασία του περιβάλλοντος.
<https://www.kodiko.gr/nomothesia/document/793411/nomos-4936-2022>
- ΝΟΜΟΣ ΥΠ' ΑΡΙΘΜ. 4951 ΦΕΚ Α 129/4.7.2022 Εκσυγχρονισμός της αδειοδοτικής διαδικασίας Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας - Β' φάση, Αδειοδότηση παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, πλαίσιο ανάπτυξης Πιλοτικών Θαλάσσιων Πλωτών Φωτοβολταϊκών Σταθμών και ειδικότερες διατάξεις για την ενέργεια και την προστασία του περιβάλλοντος
<https://www.elinyae.gr/ethniki-nomothesia/n-49512022-fek-129a-472022>

- ΝΟΜΟΣ ΥΠ’ ΑΡΙΘΜ. 5106 ΦΕΚ Α 63/1.5.2024 Ρυθμίσεις Για Την Αντιμετώπιση Της Κλιματικής Αλλαγής
<https://geotee.gr/2024/05/02/n-5106-2024-rythmiseis-gia-tin-antimetopisi-tis-klimatikis-allagis-fek-63-a-2024/>
- Σχέδιο Νόμου για την Ενσωμάτωση της Ευρωπαϊκής Οδηγίας RED III & Θεσμοθέτηση των «Περιοχών Επιτάχυνσης ΑΠΕ»
<https://www.opengov.gr/minenv/?c=39174>
- <https://wisdem.readthedocs.io/en/master/wisdem/nrelcsm/theory.html>
- https://www.bonfiglioli.com/international/en/product/700-tw-series_slew-drives_yaw-pitch-drives
- https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d196802c88df/pdf_preview_medium/Bearing_Lubrication_pdf_preview_medium.pdf
- Himalaya Shrestha (2022). “Wind energy physics and resource assessment with Python” <https://medium.com/data-science/wind-energy-physics-and-resource-assessment-with-python-789a0273e697>

Εικόνες

- Εικόνα 2,1: https://www.energymag.gr/energeia/ape/73561_dania-kratiko-20-ton-shediazomenon-yperaktion-aiolikon-parkon
- Εικόνα 2,2: https://www.researchgate.net/figure/Ilustration-of-type-I-wind-turbine-generator_fig3_256436604
- Εικόνα 2,3: https://www.researchgate.net/figure/Wind-turbine-structure-based-on-DFIG-1_fig1_361013087
- Εικόνα 2,4: https://www.researchgate.net/figure/C-P-I-wind-turbine-characteristic_fig4_266389786
- Εικόνα 2,5: https://www.researchgate.net/figure/Figure-2-Operating-zone-of-variable-speed-pitch-controlled-wind-turbine-1_fig2_322732734
- Εικόνα 2,6: https://www.researchgate.net/figure/Typical-wind-turbine-power-curve-the-turbine-begins-to-operate-at-the-cut-in-speed-v-c_fig3_320686586
- Εικόνα 2,7: **Νταλαπέρας Ι., Διονυσιακόπουλος Δ., Βαρδαξής Ρ. (2020):** Μελέτη Ενεργειακής Αυτονομίας Της Νήσου Σερύφου Μέσω Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας
- Εικόνα 3,1: <https://www.shutterstock.com/el/image-vector/sustainable-venn-diagram-3-overlapping-circles-2164798659>
- Εικόνα 4,1 – 4,5: https://www.thessaly.gov.gr/data/mpe/2020//16366/06%20%CE%95%CE%9D%C E%A4%CE%A5%CE%A0%CE%9F%20Y_signed.pdf
- Εικόνα 5,1: https://ikee.lib.auth.gr/record/351765/files/XAFIASPASIA1291_DE.pdf
Ξάθη Α. (2023): Χωροθέτηση Χερσαίων Αιολικών Εγκαταστάσεων με τη χρήση Πολυκριτηριακής Ανάλυσης και Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών: η περίπτωση της Περιφερειακής Ενότητας Σερρών
- Εικόνα 5,2: <https://www.aiolikigi.gr/el/e-learning/the-siting-of-a-wind-park/>
- Εικόνα 5,3: https://www.researchgate.net/figure/Wind-farm-with-optimum-spacing_fig4_291348908
- Εικόνα 5,4: https://www.researchgate.net/figure/Wind-farm-design-configurations-for-a-Staggered-design-b-Aligned-design-Each-row-has_fig1_342979544

- Εικόνα 5,5:
Σεβαστίδου Αικ. Φαιδ. (2018): Συντήρηση Παραγωγικού Εξοπλισμού Ειδικές Μέθοδοι Και Εφαρμογές Προγραμματισμού Συντήρησης Και Δυναμικότητας
https://dione.lib.unipi.gr/xmlui/bitstream/handle/unipi/11314/Sevastidou_1619.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Εικόνα 5,6: https://www.researchgate.net/figure/Description-of-bathtub-shaped-hazard-rate_fig1_370826483
- Εικόνα 6,1:
https://www.google.com/maps/@38.3566728,21.7592515,5321m/data=!3m1!1e3?authuser=0&entry=ttn&g_ep=EgoyMDI2MDYyMy4wIKXMDSOASAFQAw%3D%3D
- Εικόνα 6,2:
https://www.google.com/maps/@38.3566728,21.7592515,5321m/data=!3m1!1e3?authuser=0&entry=ttn&g_ep=EgoyMDI2MDYyMy4wIKXMDSOASAFQAw%3D%3D
- Εικόνα 6,3:
- Εικόνα 6,4: Διάγραμμα από υπολογισμούς του Excel με τα δεδομένα από τα στοιχεία της Α/Γ
- Εικόνα 6,5: <https://www.gamesagearbox.com/main-shafts/>
- Εικόνα 6,6: <http://www.jzbrakes.net/productview.aspx?id=19>
- Εικόνα 6,7: <https://www.ebeton.gr/project/aioliko-parko-antirriou/ergon-pasisis-aioliko-antirio-02/>
- Εικόνα 6,8: <https://www.ebeton.gr/project/aioliko-parko-antirriou/ergon-pasisis-aioliko-antirio-04/>
- Εικόνα 6,9:
<https://www.obo.global/industry-solutions/wind-power/earthing-solutions-for-wind-power-plants/>
- Εικόνα 6,10: <https://www.obo.global/industry-solutions/wind-power/earthing-solutions-for-wind-power-plants/>

Παράρτημα

Υ	ΕΝΤΥΠΟ ΥΠΟΒΟΛΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ Για την περιβαλλοντική αδειοδότηση έργων και δραστηριοτήτων ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ Α
1. Αντικείμενο Φακέλου Υποβολής	
1.A. Υποβολή Φακέλου για διαδικασία προκαταρκτικού προσδιορισμού περιβαλλοντικών απαιτήσεων-ΠΠΠΑ-(παρ. 2α του άρ. 3 ΤΟΥ Ν. 4014/2011, όπως ισχύει) νέου Έργου ή Δραστηριότητας (Παρακαλώ, σημειώστε με X το κατάλληλο τετράγωνο)	
1.A.1. ☐ Υποβολή Φακέλου ΠΠΠΑ	☐
Παρακαλώ, σημειώστε τον κατάλληλο αριθμό(π.χ. 1 για πρώτη υποβολή, 2 για δεύτερη κ.ο.κ.)	
1.A.2. Υποβολή αντιγράφων Φακέλου ΠΠΠΑ (μετά τον έλεγχο πληρότητας)	☐
1.A.3. Υποβολή πρόσθετων αντιγράφων φακέλου ΠΠΠΑ	☐
1.A.4. Υποβολή απόψεων-συμπληρωματικών στοιχείων επί των γνωμοδοτήσεων των υπηρεσιών και των φορέων της διοίκησης	☐
1.A.5. Άλλο	☐
Περιγραφή:	
1.B. Υποβολή ΜΠΕ για διαδικασία έκδοσης απόφασης έγκρισης περιβαλλοντικών όρων-ΑΕΠΟ- (παρ. 2B του άρ. 3 ΤΟΥ Ν. 4014/2011, όπως ισχύει) νέου Έργου ή Δραστηριότητας (Παρακαλώ, σημειώστε με X το κατάλληλο τετράγωνο)	
1.B.1. ☐ Υποβολή Φακέλου ΜΠΕ	☐
Παρακαλώ, σημειώστε τον κατάλληλο αριθμό(π.χ.1 για πρώτη υποβολή, 2 για δεύτερη κ.ο.κ.)	
1.B.2. Υποβολή αντιγράφων ΜΠΕ (μετά τον έλεγχο πληρότητας)	☐
1.B.3. Υποβολή πρόσθετων αντιγράφων ΜΠΕ	☐
1.B.4. Υποβολή απόψεων-συμπληρωματικών στοιχείων επί των γνωμοδοτήσεων των υπηρεσιών και των φορέων της διοίκησης καθώς και των απόψεων του κοινού και άλλων φορέων (διαδικασία διαβούλευσης)	☐
1.B.5. Άλλο	☐
Περιγραφή:	

Εικόνα 4.1: Φόρμα συμπλήρωσης ΜΠΕ (σελίδα 1/5)

Υ	ΕΝΤΥΠΟ ΥΠΟΒΟΛΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ Για την περιβαλλοντική αδειοδότηση έργων και δραστηριοτήτων ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ Α
----------	---

1.Γ. Υποβολή φακέλου για διαδικασία ανανέωσης Απόφασης Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων-ΑΕΠΟ (άρ. 5 του Ν. 4014/2011, όπως ισχύει)	
Αριθμός Πρωτοκόλλου/ Ημερομηνία Α.Ε.Π.Ο. :	
Αριθμός Διαδικτυακής Ανάρτησης (Α.Δ.Α.) :	
Περιβαλλοντική Ταυτότητα (ΠΕΤ) Έργου ή Δραστηριότητας :	
(Παρακαλώ, σημειώστε με Χ το κατάλληλο τετράγωνο)	
1.Γ.1. ☐ Υποβολή φακέλου ανανέωσης ΑΕΠΟ	☐
Παρακαλώ, σημειώστε τον κατάλληλο αριθμό(π.χ. 1 για πρώτη υποβολή, 2 για δεύτερη κ.ο.κ.)	
1.Γ.2. Υποβολή αντιγράφων φακέλου ανανέωσης ΑΕΠΟ (μετά τον έλεγχο πληρότητας)	☐
1.Γ.3. Υποβολή πρόσθετων αντιγράφων φακέλου ανανέωσης ΑΕΠΟ	☐
1.Γ.4. Άλλα Περιγραφή:	☐

1.Δ. Υποβολή ΜΠΕ για διαδικασία ανανέωσης Απόφασης Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων-ΑΕΠΟ- (παρ. 2Β του άρ. 3 & άρ. 5 του Ν. 4014/2011, όπως ισχύει)	
Αριθμός Πρωτοκόλλου / Ημερομηνία Α.Ε.Π.Ο. :	
Αριθμός Διαδικτυακής Ανάρτησης (Α.Δ.Α.) :	
Περιβαλλοντική Ταυτότητα (ΠΕΤ) Έργου ή Δραστηριότητας :	
(Παρακαλώ, σημειώστε με Χ το κατάλληλο τετράγωνο)	
1.Δ.1. ☐ Υποβολή ΜΠΕ	☐
Παρακαλώ, σημειώστε τον κατάλληλο αριθμό(π.χ. 1 για πρώτη υποβολή, 2 για δεύτερη κ.ο.κ.)	
1.Δ.2. Υποβολή αντιγράφων ΜΠΕ (μετά τον έλεγχο πληρότητας)	☐
1.Δ.3. Υποβολή πρόσθετων αντιγράφων ΜΠΕ	☐
1.Δ.4. Υποβολή απόψεων-συμπληρωματικών στοιχείων επί των γνωμοδοτήσεων των υπηρεσιών και των φορέων της διοίκησης καθώς και των απόψεων του κοινού και άλλων φορέων (διαδικασία διαβούλευσης)	☐
1.Δ.5. Άλλα Περιγραφή:	☐

: Συμπληρώνεται από τον φορέα του έργου ή της δραστηριότητας εφόσον έχει λάβει αριθμό διαδικτυακής ανάρτησης (Α.Δ.Α.)
 : Συμπληρώνεται από τον φορέα του έργου ή της δραστηριότητας εφόσον έχει λάβει ΠΕΤ σε προηγούμενο στάδιο περιβαλλοντικής αδειοδότησης

Εικόνα 4.2: Φόρμα συμπλήρωσης ΜΠΕ (σελίδα 2/5)

Υ	ΕΝΤΥΠΟ ΥΠΟΒΟΛΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ Για την περιβαλλοντική αδειοδότηση έργων και δραστηριοτήτων ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ Α
---	---

1.Ε. Υποβολή φακέλου για διαδικασία τροποποίησης Απόφασης Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων-ΑΕΠΟ- (άρ. 6 του Ν. 4014/2011, όπως ισχύει)	
Αριθμός Πρωτοκόλλου/ Ημερομηνία Α.Ε.Π.Ο. :	
Αριθμός Διαδικτυακής Ανάρτησης (Α.Δ.Α.) :	
Περιβαλλοντική Ταυτότητα (ΠΕΤ) Έργου ή Δραστηριότητας :	
(Παρακαλώ, σημειώστε με Χ το κατάλληλο τετράγωνο)	
1.Ε.1 ☐ Υποβολή φακέλου τροποποίησης ΑΕΠΟ Παρακαλώ, σημειώστε τον κατάλληλο αριθμό, 1 για πρώτη υποβολή, 2 για δεύτερη κ.ά.κ.)	☐
1.Ε.2. Υποβολή αντιγράφων φακέλου τροποποίησης ΑΕΠΟ (μετά τον έλεγχο πληρότητας)	☐
1.Ε.3. Υποβολή πρόσθετων αντιγράφων φακέλου τροποποίησης ΑΕΠΟ	☐
1.Ε.4. Άλλο Περιγραφή:	☐

1.ΣΤ. Υποβολή ΜΠΕ για διαδικασία τροποποίησης Απόφασης Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων-ΑΕΠΟ- (παρ.. 2Β του άρ. 3 & άρ. 6 του Ν. 4014/2011, όπως ισχύει)	
Αριθμός Πρωτοκόλλου/ Ημερομηνία Α.Ε.Π.Ο. :	
Αριθμός Διαδικτυακής Ανάρτησης (Α.Δ.Α.) :	
Περιβαλλοντική ΤαυτότηταΑ (ΠΕΤ) Έργου ή Δραστηριότητας :	
(Παρακαλώ, σημειώστε με Χ το κατάλληλο τετράγωνο)	
1.ΣΤ.1. ☐ Υποβολή ΜΠΕ Παρακαλώ, σημειώστε τον κατάλληλο αριθμό (π.χ. 1 για πρώτη υποβολή, 2 για δεύτερη κ.α.κ.)	☐
1.ΣΤ.2. Υποβολή αντιγράφων ΜΠΕ (μετά τον έλεγχο πληρότητας)	☐
1.ΣΤ.3. Υποβολή πρόσθετων αντιγράφων ΜΠΕ	☐
1.ΣΤ.4. Υποβολή απόψεων-συμπληρωματικών στοιχείων επί των γωνοδοτήσεων των υπηρεσιών και των φορέων της διοίκησης καθώς και των απόψεων του κοινού και άλλων φορέων (διαδικασία διαβούλευσης)	☐
1.ΣΤ.5. Άλλο Περιγραφή:	☐

1 Συμπληρώνεται από τον φορέα του έργου ή της δραστηριότητας εφόσον έχει λάβει αριθμό διαδικτυακής ανάρτησης (Α.Δ.Α.)
 2 Συμπληρώνεται από τον φορέα του έργου ή της δραστηριότητας εφόσον έχει λάβει ΠΕΤ σε προηγούμενο στάδιο περιβαλλοντικής αδειοδότησης

Εικόνα 4.3: Φόρμα συμπλήρωσης ΜΠΕ (σελίδα 3/5)

Υ	ΕΝΤΥΠΟ ΥΠΟΒΟΛΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ Για την περιβαλλοντική αδειοδότηση έργων και δραστηριοτήτων ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ Α
----------	---

1.Ζ. Υποβολή φακέλου Συμμόρφωσης Τελικού Σχεδιασμού Αριθμός Πρωτοκόλλου / Ημερομηνία Α.Ε.Π.Ο. : _____	
Αριθμός Διαδικτυακής Ανάρτησης (Α.Δ.Α.) : _____	
Περιβαλλοντική Ταυτότητα (ΠΕΤ) Έργου ή Δραστηριότητας : _____ (Παρακαλώ, σημειώστε με Χ το κατάλληλο τετράγωνο)	
1.Ζ.1. Υποβολή φακέλου Συμμόρφωσης Τελικού Σχεδιασμού	☐
1.Ζ.2. Άλλο Περιγραφή: _____	☐

1.Η. Υποβολή τεχνικής Περιβαλλοντικής Μελέτης (Παρ. 2 ΤΟΥ άρ. 7 ΤΟΥ Ν. 4014/2011, όπως ισχύει) Αριθμός Πρωτοκόλλου / Ημερομηνία Α.Ε.Π.Ο. : _____	
Αριθμός Διαδικτυακής Ανάρτησης (Α.Δ.Α.) : _____	
Περιβαλλοντική Ταυτότητα (ΠΕΤ) Έργου ή Δραστηριότητας : _____ (Παρακαλώ, σημειώστε με Χ το κατάλληλο τετράγωνο)	
1.Η.1. ☐ Υποβολή Τεχνικής Περιβαλλοντικής Μελέτης (ΤΕΠΕΜ)	☐
Παρακαλώ, σημειώστε τον κατάλληλο αριθμό (π.χ. 1 για πρώτη υποβολή, 2 για δεύτερη κ.ό.κ.)	
1.Η.2. Άλλο Περιγραφή: _____	☐

2. Αριθμός αντιγράφων που υποβάλλονται	
2.1. Σε έντυπη μορφή	_____
2.2. Σε ψηφιακή μορφή	_____

1 Συμπληρώνεται από τον φορέα του έργου ή της δραστηριότητας εφόσον έχει λάβει αριθμό διαδικτυακής ανάρτησης (Α.Δ.Α.)
 2 Συμπληρώνεται από τον φορέα του έργου ή της δραστηριότητας εφόσον έχει λάβει ΠΕΤ σε προηγούμενο στάδιο περιβαλλοντικής αδειοδότησης.

Εικόνα 4.4: Φόρμα συμπλήρωσης ΜΠΕ (σελίδα 4/5)

Υ	ΕΝΤΥΠΟ ΥΠΟΒΟΛΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ Για την περιβαλλοντική αδειοδότηση έργων και δραστηριοτήτων ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ Α	
----------	---	--

3. Συνημμένα έγγραφα (βεβαιώσεις, γνωμοδοτήσεις κλπ.) εφόσον δεν περιλαμβάνονται σε ειδικό παράρτημα του φακέλου		
3.1		☐
3.2		☐
3.3		☐
3.4		☐

Υπογραφή

Εικόνα 4.5: Φόρμα συμπλήρωσης ΜΠΕ (σελίδα 5 /5)