

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ Η.Μ.Ε & ΠΡΟ.ΠΕ.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ: “ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΩΝ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΣΕ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ”**

Σπουδαστής : ΤΙΟΠΟΥΛΟΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

Επιβλέπων : ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΖΑΦΕΙΡΑΚΗΣ

Πειραιάς, 2018

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία θα πραγματοποιηθεί επισκόπηση των τεχνολογικών επιλογών αντικεραυνικής προστασίας στον τομέα των αιολικών πάρκων. Αρχικά, θα παρατεθούν στοιχεία σχετικά με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, με έμφαση στην παραγωγή ενέργειας σε αιολικές εγκαταστάσεις. Θα αναλυθεί ο τρόπος λειτουργίας των ανεμογεννητριών και θα γίνει μία προσπάθεια παρουσίασης της κατάστασης που επικρατεί σχετικά με την παραγωγή ισχύος από τα αιολικά πάρκα σε παγκόσμιο, ευρωπαϊκό αλλά και πανελλαδικό επίπεδο.

Στη συνέχεια θα πραγματοποιηθεί ανάλυση της δημιουργίας του κεραυνικού πλήγματος αλλά και των υλικών και οικονομικών επιπτώσεων που προκαλεί, με έμφαση τους κεραυνούς που πλήττουν τις ανεμογεννήτριες. Τέλος, θα επιχειρηθεί ανάλυση των συστημάτων αντικεραυνικής προστασίας των αιολικών πάρκων. Παρατίθενται τα συστήματα γείωσης που χρησιμοποιούνται σε διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες και κάποια στοιχεία αναφορικά με το σχεδιασμό ενός συστήματος αντικεραυνικής προστασίας σε ένα αιολικό πάρκο που βρίσκεται στον Ελλαδικό χώρο.

ABSTRACT

The aim of this work is to present an overview concerning the technological options for lightning protection of wind farms. In the frame of the aforementioned survey, information on renewable sources and specifically wind energy will be displayed with a focus on wind turbine operation and wind power production at global, European and Panhellenic level.

Furthermore, technical and economical damages of lightning strikes, especially on wind turbines will be demonstrated in an effort to analyze the serious consequences of lightning strikes on wind energy structures. Finally, lightning protection systems will be assessed, studying simultaneously various earthing systems utilized in European wind farms and useful information for installation of a grounding system in Greek territory.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ABSTRACT	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	5
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	9
1.1 Πηγές Ενέργειας	9
1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στην Ελλάδα	11
1.3 Διαχείριση κινδύνων σε έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας	12
1.4 Αντικείμενο της παρούσας εργασίας	13
Κεφάλαιο 2 Αιολική Ενέργεια – Ανεμογεννήτριες – Αιολικά πάρκα	15
2.1 Αιολική Ενέργεια	15
2.1.1 Πλεονεκτήματα	16
2.1.2 Μειονεκτήματα	17
2.2 Ανεμογεννήτριες και αιολικά πάρκα	18
2.2.1 Λειτουργία και δομή της ανεμογεννήτριας	18
2.2.2 Τύποι ανεμογεννητριών	22
2.2.2.1 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα	22
2.2.2.2 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα	24

2.2.3 Αιολικά πάρκα	25
2.2.3.1 Χερσαία αιολικά πάρκα	25
2.2.3.2 Υπεράκτια αιολικά πάρκα	26
2.2.3.3 Η Αιολική Ενέργεια στην Ελλάδα	27
Κεφάλαιο 3 Μελέτη κεραυνικών πληγμάτων	31
3.1 Κεραυνός	31
3.1.1 Ηλεκτρισμένο νέφος	32
3.1.2 Παράμετροι κεραυνού	33
3.1.3 Είδη κεραυνού	34
3.1.4 Πλήγματα κεραυνού	35
3.1.4.1 Κεραυνικά πλήγματα στο ανθρώπινο σώμα	35
3.1.4.2 Κεραυνικά πλήγματα σε κατασκευές	35
3.2 Κεραυνικό πλήγμα σε ανεμογεννήτρια	40
3.3 Στατιστικά στοιχεία βλαβών σε ανεμογεννήτριες και αιολικά πάρκα	42
Κεφάλαιο 4 Αντικεραυνικά συστήματα αιολικών πάρκων	47
4.1 Αξιολόγηση κινδύνου	47
4.2 Ανάλυση Συστήματος Αντικεραυνικής Προστασίας (ΣΑΠ)	51
4.2.1 Ζώνες αντικεραυνικής προστασίας	51
4.2.2 Υποδοχείς πτερυγίων	53

<i>4.2.3 Αγωγοί καθόδου</i>	55
<i>4.2.4 Σύστημα γείωσης</i>	55
<i>4.2.4.1 Μέθοδοι γείωσης</i>	56
<i>4.2.4.2 Λοιποί παράμετροι ενός συστήματος γείωσης</i>	63
<i>4.2.4.3 Συστήματα γείωσης για αιολικά πάρκα στον Ευρωπαϊκό χώρο</i>	67
<i>4.2.4.4 Συστήματα γείωσης για αιολικά πάρκα στην Ελλάδα</i>	70
Βιβλιογραφία	77

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Πηγές Ενέργειας

Η κάλυψη των αναγκών του ταχύτατα αυξανόμενου πληθυσμού του πλανήτη, προϋποθέτει τεράστια ποσά ενέργειας. Πριν όμως από την ανάλυση των διαφόρων μορφών ενέργειας που υπάρχουν, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των κατηγοριών των ενεργειακών πηγών.

Η παραγωγή και η κατανάλωση ενέργειας απαιτεί την ύπαρξη μιας ενεργειακής πηγής, δηλαδή μιας «αποθήκης» από την οποία αντλείται. Οι ενεργειακές πηγές ταξινομούνται σε πρωτογενείς και δευτερογενείς, ανάλογα με τον αν συναντώνται άμεσα στη φύση ή αν λαμβάνονται από τη μετατροπή των πρώτων αντίστοιχα. Κατά τη μετατροπή μιας διαθέσιμης πρωτογενούς μορφής ενέργειας σε μία άλλη, δεν προκύπτουν μόνο οι επιθυμητές μορφές ενέργειας, αλλά πιθανότατα και άλλες μορφές, οι οποίες είναι ανεπιθύμητες και αποτελούν τις λεγόμενες απώλειες ενέργειας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα πρωτογενών μορφών ενέργειας είναι ο Ήλιος, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, η γεωθερμική ενέργεια ή η βιομάζα. Παραδείγματα δευτερογενών πηγών ενέργειας αποτελούν η ηλεκτρική ενέργεια, η βενζίνη και το υδρογόνο καθώς προέρχονται από μετατροπή των πρωτογενών.

Ταξινόμηση των πηγών ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί επίσης με βάση το χρόνο ζωής που έχουν σε σχέση με την ανθρώπινη κλίμακα. Ως αποτέλεσμα αυτού του τρόπου διαχωρισμού είναι να δημιουργούνται οι κατηγορίες των ανανεώσιμων ή ήπιων μορφών ενέργειας και των μη-ανανεώσιμων ή συμβατικών πηγών.

Η ενέργεια για την ανθρώπινη κλίμακα είναι ένας περιορισμένος πόρος, επειδή τα αποθέματα πρωτογενών αρχικών πόρων είναι συγκεκριμένα και περιορισμένα. Η χαρακτηριστικότερη μορφή συμβατικής πηγής ενέργειας είναι τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, γαιάνθρακες, φυσικό αέριο), ενώ ένα παράδειγμα ήπιας μορφής ενέργειας είναι η αιολική.

Ακόμη και οι λεγόμενες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας προέρχονται από άλλες, περιορισμένες και κατ' επέκταση εξαντλήσιμες πηγές. Για παράδειγμα η ηλιακή ενέργεια που δέχεται η Γη για ένα συγκεκριμένο διάστημα είναι μία πεπερασμένη ποσότητα, επειδή προέρχεται από την ακτινοβολία του αστέρα Ήλιου. Απλώς στην περίπτωση αυτή, η διάρκεια ζωής του Ήλιου είναι τόσες τάξης μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή του ανθρώπου, ώστε να θεωρείται ανεξάντλητη.

Μη ανανεώσιμες ή συμβατικές πηγές ενέργειας, χαρακτηρίζονται οι μορφές ενέργειας οι οποίες δεν αναπληρώνονται ή αναπληρώνονται εξαιρετικά αργά για τα ανθρώπινα μέτρα, μέσω φυσικών διαδικασιών. Στις μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας περιλαμβάνονται τα ορυκτά καύσιμα και η πυρηνική ενέργεια. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των ορυκτών καυσίμων, είναι ότι παράγουν πολύ μεγάλα ποσά ενέργειας. Λόγω του ότι είναι εύφλεκτα, οι περισσότεροι κινητήρες εσωτερικής καύσης χρειάζονται μόνο ένα μικρό ποσό από αυτά προκειμένου να λειτουργήσουν. Άλλο σημαντικό πλεονέκτημα είναι το γεγονός ότι επειδή τα ορυκτά καύσιμα είναι εύκολα διαθέσιμα, τα καθιστά εύχρηστα, ιδιαίτερα στον τομέα των εξαγωγών προϊόντων. Οι εξελίξεις στην επιστήμη, στην τεχνολογία, τις μεθόδους δύλισης και τις διαδικασίες εξόρυξης, συμβάλλουν σημαντικά στην περαιτέρω διευκόλυνση της διαθεσιμότητάς τους.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα των ορυκτών καυσίμων είναι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούν στον πλανήτη. Με την καύση τους προκαλούν εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα με απότοκο να εντείνεται το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί σε υπερθέρμανση του πλανήτη, με αποτέλεσμα λιώσιμο μεγάλων εκτάσεων πάγων που βρίσκεται στους πόλους. Η τήξη των πάγων έχει ως απότοκο να πλημμυρίζουν περιοχές χαμηλού υψομέτρου με οδυνηρές συνέπειες για τους κατοίκους των περιοχών αυτών. Μία, επίσης, πολύ επιβλαβής συνέπεια για το φυσικό περιβάλλον της χρήσης των ορυκτών καυσίμων, είναι η συμβολή τους στο σχηματισμό της όξινης βροχής. Κατά την καύση, τα ορυκτά καύσιμα παράγουν διοξείδιο του θείου, το οποίο είναι ένας παράγοντας που οδηγεί στο σχηματισμό της όξινης βροχής. Το φαινόμενο αυτό καταστρέφει τα μνημεία που είναι κατασκευασμένα από τούβλα ή μάρμαρα, ακόμα και καλλιέργειες

Ως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, έχουν οριστεί οι ενεργειακές πηγές οι οποίες υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον. Είναι η πρώτη μορφή ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος πριν στραφεί έντονα στη χρήση ορυκτών καυσίμων. Οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας είναι πρακτικά ανεξάντλητες όμως η χρήση τους ρυπαίνει το περιβάλλον ενώ η

αξιοποίησή τους περιορίζεται μόνο από την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδεκτών τεχνολογιών που θα έχουν σαν σκοπό τη δέσμευση του δυναμικού τους. Το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών εμφανίστηκε αρχικά μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1974 και παγιώθηκε μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων σοβαρών περιβαλλοντικών προβλημάτων την τελευταία εικοσαετία. Οι κυριότερες μορφές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι η ηλιακή, η αιολική, η υδραυλική, η γεωθερμική ενέργεια, η βιομάζα και η ενέργεια των θαλασσών.

1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στην Ελλάδα

	Primary production (thousand toe)		Share of total, 2015 (%)				
	2005	2015	Biomass & waste	Hydropower	Wind energy	Solar energy	Geothermal
EU-28	119 878.7	205 043.2	63.5	14.3	12.7	6.4	3.2
Belgium	874.8	2 958.6	73.1	0.9	16.2	9.7	0.1
Bulgaria	1 123.8	2 032.6	61.3	23.9	6.1	6.9	1.6
Czech Republic	2 274.1	4 279.3	90.3	3.6	1.2	5.0	0.0
Denmark	2 513.8	3 528.4	63.0	0.0	34.4	2.4	0.1
Germany	16 850.5	38 886.1	67.5	4.2	17.5	10.3	0.5
Estonia	692.2	1 286.3	95.0	0.2	4.8	0.0	0.0
Ireland	366.1	980.7	34.0	7.1	57.6	1.3	0.0
Greece	1 643.4	2 640.7	44.6	19.9	15.0	20.1	0.4
Spain	8 397.7	16 873.5	41.5	14.3	25.1	18.9	0.1
France	15 728.2	21 416.9	65.0	21.9	8.5	3.4	1.0
Croatia	1 855.4	2 227.6	71.1	24.7	3.1	0.7	0.5
Italy	13 328.5	23 563.9	45.6	16.6	5.4	9.2	23.2
Cyprus	47.7	118.0	15.8	0.0	16.1	66.8	1.4
Latvia	1 853.8	2 330.1	92.6	6.9	0.5	0.0	0.0
Lithuania	899.8	1 466.1	92.7	2.0	4.7	0.4	0.1
Luxembourg	71.6	113.0	75.2	7.5	7.8	9.6	0.0
Hungary	1 189.1	3 239.9	93.6	0.6	1.8	0.7	3.3
Malta	0.5	14.8	16.9	0.0	0.0	83.1	0.0
Netherlands	1 970.1	4 810.4	82.6	0.2	13.5	2.6	1.2
Austria	7 078.7	9 303.3	58.1	34.2	4.5	2.9	0.4
Poland	4 549.4	8 635.2	86.5	1.8	10.8	0.6	0.3
Portugal	3 474.7	5 182.1	59.9	14.4	19.3	2.9	3.6
Romania	4 984.2	5 935.0	62.3	24.1	10.2	2.9	0.5
Slovenia	773.9	1 025.6	60.4	31.9	0.0	3.4	4.2
Slovakia	861.0	1 591.6	75.6	20.9	0.0	3.1	0.4
Finland	8 163.8	10 394.4	84.2	13.9	1.9	0.0	0.0
Sweden	14 825.6	18 374.5	57.0	35.2	7.6	0.1	0.0
United Kingdom	3 486.4	11 834.7	60.2	4.6	29.3	5.9	0.0
Iceland	2 383.6	4 917.2	0.0	24.1	0.0	0.0	75.8
Norway	12 955.6	13 266.5	9.0	89.4	1.6	0.0	0.0
Montenegro	306.0	326.4	60.7	39.3	0.0	0.1	0.0
The former Yugoslav Republic of Macedonia	343.2	399.4	54.7	40.2	2.6	0.5	2.0
Albania	694.3	733.3	29.2	69.1	0.0	1.7	0.0
Serbia	1 937.4	1 984.0	56.0	43.7	0.0	0.0	0.3
Turkey	10 130.6	15 673.9	20.5	36.8	6.4	5.4	30.8
Bosnia and Herzegovina (*)	697.5	2 277.7	77.6	22.4	0.0	0.0	0.0
Kosovo (*)	176.2	268.4	95.4	4.5	0.0	0.1	0.0

(*) 2014 instead of 2015.

(*) This designation is without prejudice to positions on status, and is in line with UNSCR 1244/1999 and the ICJ Opinion on the Kosovo declaration of independence.

Source: Eurostat (online data code: nrg_107a)

Σχήμα 1.1 Παραγωγή ενέργειας από ήπιες μορφές για τις Ευρωπαϊκές χώρες

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση (E.E), το μερίδιο της ενεργειακής κατανάλωσης από ανανεώσιμες πηγές αυξήθηκε από 8.5% το 2004 σε 16.7% το 2015, ενώ ο στόχος που πρέπει να επιτευχθεί έως το 2020 είναι 20%. Την ίδια περίοδο, η ενεργειακή κατανάλωση από ανανεώσιμες πηγές στην Ελλάδα αυξήθηκε από 6.9% το 2004 σε 13.5% το 2012 και σε 15.4% το 2015. Η

κατανάλωση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στην Ελλάδα πρέπει να φτάσει το 18% έως το 2020. Το 2015, τα υψηλότερα ποσοστά ενεργειακής κατανάλωσης από ανανεώσιμες πηγές καταγράφονται στη Σουηδία (53.9%), τη Φινλανδία (39.3%), τη Λετονία (37.6%) και την Αυστρία (32.1%), ενώ τα χαμηλότερα καταγράφονται στο Λουξεμβούργο και τη Μάλτα (5%), στην Ολλανδία (5.8%), το Βέλγιο (7.9%) και τη Μ. Βρετανία (8.2%). Ενδεκα κράτη-μέλη (Βουλγαρία, Τσεχία, Δανία, Εσθονία, Κροατία, Ιταλία, Λιθουανία, Ουγγαρία, Ρουμανία, Φινλανδία και Σουηδία) έχουν ήδη πετύχει τους εθνικούς στόχους του 2020 για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Χαρακτηριστικά παρατίθεται στο Σχήμα 1.1 η παραγωγή ενέργειας από ήπιες μορφές για τις χώρες που είναι μέλη της Ε.Ε. αλλά και χώρες υποψήφιες προς ένταξη για τα έτη 2005 και 2015. Στην Ελλάδα η ενεργειακή παραγωγή από αιολικές εγκαταστάσεις βρίσκεται στην τέταρτη θέση πίσω από τη Βιομάζα, την Ηλιακή και την Υδροηλεκτρική. Οπότε όπως εύκολα γίνεται αντιληπτό, υπάρχουν πολλές προοπτικές βελτίωσης αν αναλογιστεί κανείς το ισχυρό αιολικό δυναμικό της χώρας.

1.3 Διαχείριση κινδύνων σε έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Η διαδικασία της διαχείρισης ενός έργου αποτελείται από πέντε επιμέρους λειτουργίες: την επιλογή, τον ορισμό, το σχεδιασμό, τον έλεγχο και την αποπεράτωση. Σε αυτές, προστίθενται η διαχείριση κινδύνων και η διαχείριση ποιότητας που αποσκοπούν στην ορθή και βέλτιστη διεκπεραίωση του εγχειρήματος.

Όσον αφορά τη διαχείριση κινδύνου, η μοναδικότητα κάθε έργου οδηγεί στο να εμπεριέχει αυτό έναν υψηλό βαθμό αβεβαιότητας. Η διαχείριση κινδύνου είναι μία, ιδιαίτερα σημαντική, συστηματική διαδικασία που στοχεύει στον εντοπισμό και στην ελαχιστοποίηση των απειλών που προέρχονται από την υλοποίηση και το περιβάλλον του έργου. Ο σχεδιασμός ξεκινά από την επιλογή και είναι μία διαρκής διαδικασία σε όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος. Κατά το στάδιο του ελέγχου, οι ενέργειες της λειτουργίας διαχείρισης κινδύνου προστίθενται μαζί με τις δράσεις του σταδίου ελέγχου, καθώς πραγματοποιείται παρακολούθηση και έλεγχος για κάθε κίνδυνο και όποτε κρίνεται απαραίτητο λαμβάνονται οι κατάλληλες ενέργειες απόκρισης και αντιμετώπισής τους.

Οι κίνδυνοι που σχετίζονται με την κατασκευή ενός έργου από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας είναι κοινωνικής, νομικής, πολιτικής, τεχνικής και οικονομικής φύσης. Στην κατηγορία των τεχνικών κινδύνων εντάσσονται τα απρόοπτα φυσικά φαινόμενα όπως πλημμύρες, σεισμοί, έκτακτα καιρικά φαινόμενα (καταιγίδες, χαλαζοπτώσεις κ.α.), γεωτεχνικά προβλήματα (π.χ. κατολισθήσεις) κ.α..

Ένας από τους σημαντικότερους κινδύνους που αντιμετωπίζουν τα αιολικά πάρκα είναι ο κίνδυνος των κεραυνικών πληγμάτων στις εγκαταστάσεις τους, κυρίως στις ανεμογεννήτριες.

1.4 Αντικείμενο της παρούσας εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η επισκόπηση των αντικεραυνικών τεχνολογιών σε αιολικά πάρκα. Θα παρατεθούν στοιχεία αναφορικά με τα κεραυνικά πλήγματα αλλά και τις υπάρχουσες τεχνολογίες αντικεραυνικές προστασίες που χρησιμοποιούνται στον Ευρωπαϊκό χώρο. Στο πλαίσιο αυτό θα μελετηθούν και οι βλάβες που προκαλούνται καθώς και ο οικονομικός αντίκτυπος που έχουν στις αιολικές εγκαταστάσεις.

Κεφάλαιο 2

Αιολική Ενέργεια – Ανεμογεννήτριες – Αιολικά πάρκα

2.1 Αιολική Ενέργεια

Ως ανανεώσιμες ή ήπιες πηγές ενέργειας, έχουν οριστεί οι μορφές ενέργειας οι οποίες υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον. Τις ήπιες μορφές ενέργειας, χρησιμοποίησε αρχικά ο άνθρωπος πριν στραφεί έντονα στη χρήση των συμβατικών μορφών ενέργειας (ορυκτά κάυσιμα, πυρηνική ενέργεια κ.λ.π.) και είναι πρακτικά ανεξάντλητες, ενώ η χρήση τους δε ρυπαίνει το περιβάλλον. Η αξιοποίησή τους σε ευρεία κλίμακα περιορίζεται μόνο από την ανάπτυξη οικονομικά αποδεκτών αλλά και ταυτόχρονα αποδοτικών τεχνολογιών που θα έχουν στόχο την πλήρη εκμετάλλευση του ενεργειακού τους περιεχομένου. Οι κυριότερες Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.) είναι η ηλιακή, η αιολική, η υδραυλική, η γεωθερμική και η ενέργεια που προέρχεται από τη βιομάζα [1].

Η αιολική ενέργεια, το όνομα της οποίας προέρχεται από τον Αίοιο, ο οποίος σύμφωνα με την ελληνική μυθολογία ήταν ο θεός του ανέμου, είναι η ενέργεια που προέρχεται από τη μετακίνηση των αέριων μαζών της ατμόσφαιρας. Δημιουργείται, έτσι, έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία, εξαιτίας της οποίας η επιφάνεια της Γης θερμαίνεται ανομοιόμορφα, προκαλώντας τη μετακίνηση τεράστιων μαζών αέρα από περιοχή σε περιοχή, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο τους ανέμους. Πιο συγκεκριμένα, καθώς ο αέρας διαστέλλεται λόγω της θέρμανσης, γίνεται ελφρύτερος με αποτέλεσμα να ανεβαίνει σε ύψος ~10km από την επιφάνεια της θάλασσας και να κατευθύνεται προς τα ψυχρότερα μέρη του πλανήτη (βορράς ή νότος), προκαλώντας έτσι μείωση της ατμοσφαιρικής πίεσης. Ως εκ τούτου, ψυχρές μάζες αέρα να κατευθύνονται προς περιοχές χαμηλού βαρομετρικού. Η κίνηση αυτή των μαζών αέρα δημιουργεί τους ανέμους [2,3]

2.1.1 Πλεονεκτήματα

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μία, ιδιαίτερα, ελκυστική λύση στο πρόβλημα της ηλεκτροπαραγωγής καθώς παρουσιάζει μία πλειάδα πλεονεκτημάτων

Το «καύσιμο» (άνεμος) που χρειάζεται, είναι άφθονο, αποκεντρωμένο και δωρεάν.

Δεν εκλύονται στην ατμόσφαιρα αέρια θερμοκηπίου και άλλοι ρύποι με αποτέλεσμα οι επιπτώσεις στο περιβάλλον να είναι μηδαμινές σε σύγκριση με τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικά καύσιμα. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η χρήση μιας ανεμογεννήτριας 600 kW υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίες, αποτρέπει την ελευθέρωση 12000 τόνων CO₂ που θα αποβάλλονταν στο περιβάλλον ετησίως από μία ηλεκτροπαραγωγική πηγή η οποία θα χρησιμοποιούσε τον άνθρακα ως καύσιμο.

Τα οικονομικά οφέλη μιας περιοχής στην οποία αναπτύσσεται η αιολική βιομηχανία είναι αξιοσημείωτα, καθώς δημιουργεί νέες θέσεις εργασίας και ενισχύει την τοπική οικονομία μέσω της μετακίνησης παραγωγικού ανθρώπινου δυναμικού σε περιοχές, συνήθως δυσπρόσιτες, αναζωογονώντας με αυτό τον τρόπο και τις λοιπές επιχειρήσεις της περιοχής.

Οι ανεμογεννήτριες έχουν τη δυνατότητα να εγκατασταθούν σε αγροκτήματα ή ράντσα, ωφελώντας την οικονομία αγροτικών περιοχών, οι οποίες χαρακτηρίζονται συνήθως ιδανικές για τέτοιου είδους εγκαταστάσεις. Αν η χρήση των ανεμογεννητριών πραγματοποιείται σε ιδιόκτητη περιουσία, ο κάτοχος της έχει τη δυνατότητα να επωφελείται διπλά αν διαθέτει μεγάλη έκταση την οποία παράλληλα καλλιεργεί, καθώς οι ανεμογεννήτριες καταλαμβάνουν ένα μικρό μέρος της έκτασής του, δίνοντάς του τη δυνατότητα να εκμεταλλεύεται την υπόλοιπη, ενώ παράλληλα θα λαμβάνει ενοίκιο για την παραχώρηση της έκτασής του που θα χρησιμοποιείται από τις ανεμογεννήτριες. Αρκετές είναι, ακόμα, οι περιπτώσεις συνεργασιών μεταξύ των επιχειρηματιών που σχετίζονται με την παραγωγή και πώληση ηλεκτρικής ενέργειας με ανεμογεννήτριες και των ιδιοκτητών των εκτάσεων που εγκαθίστανται, προσφέροντας τη δυνατότητα για πολυεπίπεδη συνεργασία, μεταξύ κλάδων της οικονομίας, οι οποίοι υπό άλλες συνθήκες δε θα είχαν τη δυνατότητα να συνεργαστούν.

Η αποτελεσματική αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας, μπορεί να βοηθήσει στην εξασφάλιση ενεργειακής αυτάρκειας μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών ή κρατών με αναιμική οικονομία, αλλά με πολλές δυνατότητες όπως είναι τα αφρικανικά κράτη. Υπό αυτή την έννοια, η

αξιοποίηση έστω ενός μέρους του αιολικού δυναμικού που διαθέτει μία χώρα, δύναται να ενισχύσει την ενεργειακή ανεξαρτησία αλλά και την ασφάλεια.

Η αιολική ενέργεια είναι σήμερα η φθηνότερη μορφή ενέργειας, αφού το κόστος της ανέρχεται σε 4 – 6 cent / kWh (cent του ευρώ ανά κιλοβατόρα), με την ακριβή τιμή να εξαρτάται από την ύπαρξη/παροχή ανέμου και από τη χρηματοδότηση ή μη του εκάστοτε προγράμματος παραγωγής αιολικής ενέργειας. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω οικονομικά στοιχεία η αξιοποίηση σε μεγαλύτερο βαθμό του αιολικού δυναμικού, θα μπορούσε να αποτελέσει εναλλακτική πρόταση σε σχέση με την οικονομία του πετρελαίου.

Ο εξοπλισμός που απαιτείται είναι σχετικά απλός στην κατασκευή και τη συντήρησή του και διαθέτει μεγάλο χρόνο ζωής.

Η λειτουργία σύγχρονων ανεμογεννητριών είναι αισθητά αθόρυβη. Το επίπεδο της έντασης του ήχου σε απόσταση 40 μέτρων από μία ανεμογεννήτρια είναι 50 – 60 db (A) που αντιστοιχεί στην ένταση μίας μέσης ανθρώπινης ομιλίας [4-6].

2.1.2 Μειονεκτήματα

Παρά τα αναφερθέντα στο υποκεφάλαιο 2.1.1 πλεονεκτήματα, η αιολική ενέργεια έχει και κάποια σημαντικά μειονεκτήματα, τα οποία ως ένα σημαντικό βαθμό λειτουργούν αποτρεπτικά στην εξάπλωσή της.

Ως μορφή ενέργειας παρουσιάζει χαμηλή πυκνότητα ισχύος με αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 30 % ή και χαμηλότερο. Συνεπώς, απαιτείται η λειτουργία πολλών ανεμογεννητριών για την παραγωγή αξιόλογης ισχύος και κατ' επέκταση αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια γης. Αυτός είναι και ο σημαντικότερος λόγος που μέχρι τώρα χρησιμοποιείται σαν συμπληρωματική πηγή ενέργειας.

Η λειτουργία των ανεμογεννητριών παρουσιάζει διακύμανση ως προς την απόδοση ισχύος εξαιτίας της μεταβαλλόμενης έντασης του ανέμου, κατά τη διάρκεια της ημέρας, του μήνα και του. Η αιολική ενέργεια δεν μπορεί να αποθηκευτεί, εκτός αν πραγματοποιηθεί χρήση ειδικών μπαταριών που θα οδηγήσει όμως με τη σειρά του σε εκτόξευση του οικονομικού κόστους.

Πριν την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών σε μία περιοχή, είναι απαραίτητη η έρευνα και η χαρτογράφηση του αιολικού δυναμικού μεγάλων περιοχών με στόχο τον εντοπισμό των ευνοϊκότερων σημείων. Αυτή η διαδικασία αυξάνει το κόστος έρευνας και εγκατάστασης και σε κάποιες περιπτώσεις καθιστά οικονομικά ασύμφορη την επένδυση.

Από τη λειτουργία των ανεμογεννητριών δημιουργείται μία μορφή ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης, εξαιτίας της ανάκλασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων πάνω στα περιστρεφόμενα πτερύγια της πτερωτής.

Η λειτουργία μίας μεγάλης ανεμογεννήτριας σε μία σχετικά «κλειστή» περιοχή δημιουργεί άσχημη οπτική εντύπωση, προκαλώντας υπό αυτή την έννοια, πρόβλημα αισθητικής.

Οι ανεμογεννήτριες μπορεί να προκαλέσουν τραυματισμούς ή θανατώσεις πουλιών, κυρίως αποδημητικών γιατί τα ενδημικά «συνηθίζουν» την παρουσία των μηχανών και τις αποφεύγουν. Για αυτό το λόγο είναι προτιμότερο να μην κατασκευάζονται αιολικά πάρκα σε δρόμους μετανάστευσης πουλιών. Σε κάθε περίπτωση, πριν τη δημιουργία ενός αιολικού πάρκου ή και οποιασδήποτε εγκατάστασης ΑΠΕ θα πρέπει να έχει προηγηθεί Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (Μ.Π.Ε.) [4-6].

2.2 Ανεμογεννήτριες και αιολικά πάρκα

2.2.1 Λειτουργία και δομή της ανεμογεννήτριας

Σκοπός της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας είναι η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Κατά τη διέλευση του ανέμου μέσω του λεγόμενου ανεμοκινητήρα, ένα μέρος της κινητικής ενέργειας που διαθέτει, δεσμεύεται από τα πτερύγια και μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια, η οποία με τη σειρά της μετατρέπεται σε ηλεκτρική αφού πρώτα οδηγηθεί στο ρότορα της γεννήτριας με τη βοήθεια του μηχανικού συστήματος οδήγησης. Στη συνέχεια, με χρήση κατάλληλου εξοπλισμού διακοπών, εξοπλισμού προστασίας, γραμμών μεταφοράς και μετασχηματιστών, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτεί το ηλεκτρικό δίκτυο, οδηγούμενη απευθείας στους καταναλωτές ή σε κάποιο αποθηκευτικό μέσο. Ο σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι εξοπλισμένος με ένα σύστημα εποπτείας και ελέγχου για την αντιμετώπιση διαφόρων ζητημάτων που προκύπτουν

κατά την παραγωγή και τη διοχέτευση της ηλεκτρικής ενέργειας, όπως συχνές αλλαγές στο κύριο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας με το οποίο είναι συνδεδεμένος ή πιθανές μεταβολές του ανέμου [7]. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που η ένταση του ανέμου είναι πολύ υψηλή, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα η τουρμπίνα της ανεμογεννήτριας να υποστεί μεγάλες φθορές ακόμα και καταστροφή, γεγονός που αποφεύγεται με τη χρήση μίας πέδης, η οποία περιορίζει την υπερβολική αύξηση των στροφών που αναπτύσσεται στα πτερύγια.

Μία συνηθισμένη ανεμογεννήτρια διαθέτει ένα, δύο ή τρία πτερύγια. Δύο είναι οι χαρακτηριστικοί τύποι ανεμογεννητριών, οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα και οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, η λειτουργία των οποίων θα αναλυθεί σε ακόλουθο υποκεφάλαιο. Η χρήση των ανεμογεννητριών πραγματοποιείται σε αυτόνομες εφαρμογές, σε σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο, σε σύνδεση με φωτοβολταϊκά συστήματα παραγωγής ενέργειας ή μπαταρίες ή ακόμα και σε συνδυασμό με τη λειτουργία γεννητριών ντίζελ. Ο σχεδιασμός λειτουργίας τους πραγματοποιείται με σκοπό να λειτουργούν σε σταθερή ή μεταβαλλόμενη ταχύτητα. Όταν μία ανεμογεννήτρια είναι σχεδιασμένη να λειτουργεί σε μεταβαλλόμενη ταχύτητα, η απόδοσή της είναι αυξημένη κατά 8 – 15 % σε σχέση με τη απόδοση λειτουργίας μίας ανεμογεννήτριας με σταθερή ταχύτητα. Οι ανεμογεννήτριες μεταβαλλόμενης ταχύτητας, όμως, εμφανίζουν αυξημένο κόστος κατασκευής και λειτουργίας σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας, καθώς η λειτουργία των πρώτων απαιτεί τη χρήση ηλεκτρονικών μετατροπέων ενέργειας, εξασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο σταθερή συχνότητα και τάση.

Αφού αναφέρθηκαν μερικά χαρακτηριστικά της γενικής λειτουργίας των ανεμογεννητριών, στη συνέχεια θα αναφερθούν και θα αναλυθεί ο τρόπος χρήσης των βασικών και των επιμέρους στοιχείων από τα οποία αποτελείται μία ανεμογεννήτρια. Τα τρία βασικά μέρη μίας ανεμογεννήτριας είναι η νασέλλα, ο πύργος και η βάση [8,9]. Ακολουθεί η ανάλυση των βασικών μαζί με τα επιμέρους μέρη της ανεμογεννήτριας.

a. *Νασέλλα*: είναι τοποθετημένη στην κορυφή του πύργου μίας ανεμογεννήτριας (Σχήμα 2.1) συνδεδεμένη με το στροφέα. Στο εσωτερικό της διαθέτει τους άξονες χαμηλής και υψηλής ταχύτητας, το κιβώτιο ταχυτήτων (σύστημα μετάδοσης), τη γεννήτρια, τον ελεγκτή και την πέδη.

b. *Στροφέας*: αποτελείται από τον άξονα και τα πτερύγια

c. *Πτερύγια*: Η περιστροφή των πτερυγίων, με τη βοήθεια του ανέμου, ουσιαστικά, μετατρέπει την κίνηση του ανέμου σε κυκλική κίνηση στην ανεμογεννήτρια. Ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην απόδοση της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας είναι το αεροδυναμικό σχήμα των πτερυγίων. Οι ανεμογεννήτριες αποτελούνται, συνήθως, από τρία πτερύγια. Δύο πτερύγια διαθέτουν κάποιες πολύ μικρές ανεμογεννήτριες, έτσι ώστε να διευκολύνεται η κατασκευή και η εγκατάστασή τους. Η λειτουργία μίας ανεμογεννήτριας με τρία πτερύγια, εμφανίζει πλεονεκτήματα σε σχέση με τη λειτουργία μίας ανεμογεννήτριας με δύο πτερύγια, καθώς η πρώτη εμφανίζει ένταση των δονήσεων και κατ' επέκταση της φθοράς αλλά και του θορύβου που προκαλείται από την περιστροφή. Επίσης, μεγαλύτερος αριθμός μικρότερων πτερυγίων συνεπάγεται λειτουργία μίας ανεμογεννήτριας σε χαμηλότερο αριθμό Reynolds (Re) (αναφορά), οδηγώντας σε χαμηλότερη απόδοση λειτουργίας. Ένα σημαντικό μειονέκτημα της χρήσης μεγάλου αριθμού πτερυγίων σχετίζεται με την αύξηση του κόστους κατασκευής. Τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται τα πτερύγια σύγχρονης τεχνολογίας είναι αλουμίνιο, λεπτά στρώματα ξύλου ή ενισχυμένο με γυαλί ελαφρύ πλαστικό.

d. *Άξονας χαμηλής ταχύτητας*: είναι συνδεδεμένος με τον στροφέα και το κιβώτιο ταχυτήτων. Η ταχύτητα περιστροφής του είναι 30 – 60 περιστροφές ανά λεπτό (rpm) και κινείται με τη βοήθεια του στροφέα.

e. *Σύστημα μετάδοσης*: το κιβώτιο ταχυτήτων, το οποίο είναι ένα ακριβό και βαρύ στοιχείο μίας ανεμογεννήτριας, συνδέοντας τον άξονα χαμηλής ταχύτητας με τον άξονα υψηλής ταχύτητας επιτυγχάνει την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής από 30 – 60 rpm (άξονας χαμηλής ταχύτητας) σε 1200 -1500 rpm, ταχύτητα απαραίτητη για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος με βάση τις συνήθειες προδιαγραφές λειτουργίας των γεννητριών. Ανάλογα με την απόδοση λειτουργίας μίας ανεμογεννήτριας, στα 150 kW, στα 300 kW και άνω των 450 kW το σύστημα μετάδοσης διαμορφώνεται στα δύο επίπεδα, στα τρία επίπεδα (ουσιαστικά είναι δύο επίπεδα και ενδιάμεσος άξονας) και στα δύο επίπεδα με χρήση ενός οδοντωτού τροχού, αντίστοιχα.

f. *Άξονας υψηλής ταχύτητας*: αποτελεί το συνδετικό κρίκο του κιβωτίου ταχυτήτων και της γεννήτριας, με το πρώτο να προκαλεί την κίνηση του άξονα ο οποίος θέτει σε λειτουργία τη γεννήτρια για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

g. *Γεννήτρια*: παράγει εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα μέσω της μετατροπής της κινητικής ενέργειας του ανέμου.

h. *Ελεγκτής*: αλλάζει την κατεύθυνση της νασέλλας με στόχο ο στροφέας να βρίσκεται συνεχώς κόντρα στη ροή του ανέμου, δίνοντας εντολές στον κινητήρα παρεκτροπής. Θέτει σε λειτουργία το στροφέα για ταχύτητες 8 – 16 μίλια ανά ώρα (mph) και σταματά τη λειτουργία του όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί τα 65 mph, για να μην υπερθερμανθεί η γεννήτρια. Τις παραπάνω λειτουργίες τις πραγματοποιεί μέσω δεδομένων που λαμβάνει από το ανεμόπτερο. Η λειτουργία, όμως, του ελεγκτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς καταγράφει την τάση, την πυκνότητα ρεύματος, το επίπεδο δόνησης και υδραυλικής πίεσης αλλά και τη θερμοκρασία της νασέλλας, που αποτελούν βασικές παραμέτρους της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας.

i. *Πέδη*: είναι ένα πολύ σημαντικό στοιχείο της λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας, καθώς σταματά τη λειτουργία του στροφέα όταν εμφανιστεί κίνδυνος, αποτελώντας πρακτικά ένα δισκόφρενο, το οποίο λειτουργεί με μηχανικό, ηλεκτρικό ή υδραυλικό τρόπο. Η υπερβολική ταχύτητα μιας ανεμογεννήτριας πραγματοποιείται αεροδυναμικά ή εφαρμόζοντας μηχανική πέδηση, με τον πρώτο τρόπο να είναι συγκριτικά καλύτερος. Προκειμένου να πραγματοποιηθούν εργασίες συντήρησης, ο στροφέας σταματά την περιστροφή του μέσω ενός μηχανικού δισκόφρενου. Προκειμένου να αποφευχθεί η φθορά τους, τα μηχανικά αυτά φρένα θέτονται σε λειτουργία αφού έχει προηγηθεί μείωση της ταχύτητας του στροφέα με ηλεκτρομαγνητική πέδηση

j. *Μηχανισμός και κινητήρας παρεκτροπής*: ο μηχανισμός αυτός, όπως έχει ήδη αναφερθεί, σχετίζεται με την αλλαγή κατεύθυνσης της νασέλλας, προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι ο στροφέας θα βρίσκεται συνεχώς κόντρα στην κατεύθυνση του ανέμου.

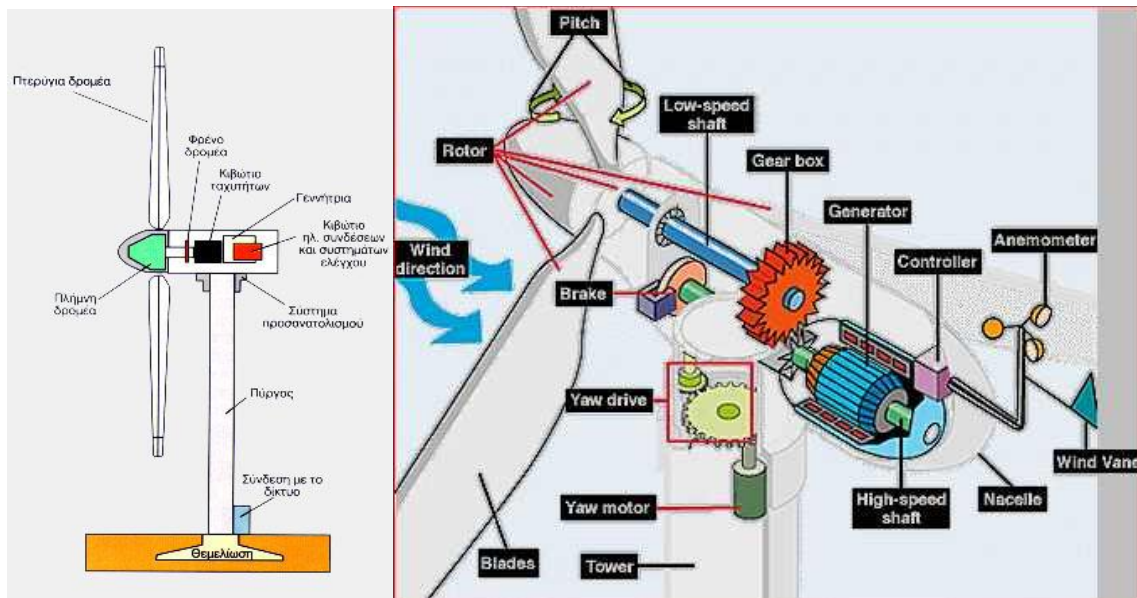
k. *Ανεμόμετρο*: όπως δηλώνει το όνομά του, η λειτουργία του σχετίζεται με τον υπολογισμό της ταχύτητας του ανέμου. Τα δεδομένα που συλλέγει μεταφέρονται στον ελεγκτή.

l. *Ανεμοδείκτης*: σχετίζεται με τη μεταφορά δεδομένων που αφορούν την κατεύθυνση του ανέμου στον ελεγκτή, με σκοπό την κατάλληλη ενεργοποίηση του μηχανισμού παρεκτροπής.

m. *Πλήμνη*: στο τμήμα αυτό της ανεμογεννήτριας, το οποίο αποτελείται από χυτοσίδηρο, στερεώνονται τα πτερύγια.

n. *Πύργος*: σε αυτόν στηρίζεται η νασέλλα και ο στροφέας. Ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα τόσο για τον σχεδιασμό όσο και για την κατασκευή της ανεμογεννήτριας αποτελεί το ύψος της. Αυξανόμενου του ύψους, αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου με αποτέλεσμα να παράγονται

μεγαλύτερες ποσότητες ηλεκτρικού ρεύματος. Η λεγόμενη διάτμηση του ανέμου, δηλαδή η μεταβολή της ταχύτητας ανάλογα με το ύψος είναι εντονότερη κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Διπλασιάζοντας το ύψος του πύργου, έχει ως απότοκο την αύξηση του ανέμου σε ποσοστό 10 %, το οποίο με τη σειρά του οδηγεί σε αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής κατά 35 %. Η αύξηση βέβαια του ύψους, συνοδεύεται και από μεγαλύτερο κατασκευαστικό κόστος. Το υλικό κατασκευής των πύργων είναι χάλυβας, χαλύβδινο πλέγμα ή συμπαγές τσιμέντο. Συνήθως, οι πύργοι ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι σωληνοειδείς χαλύβδινοι.



Σχήμα 2.1 Δεξιά: στοιχεία ανεμογεννήτριας; Αριστερά: εσωτερικό της νασέλλας μιας ανεμογεννήτριας

2.2.2 Τύποι ανεμογεννητριών

2.2.2.1 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα

Ο άξονας περιστροφής των ανεμογεννητριών αυτού του τύπου είναι κάθετος στη ροή του ανέμου αλλά και στο έδαφος (Σχήμα 2.2) και αποτελεί τον τύπο ανεμογεννητριών που δε χρησιμοποιείται συχνά στα αιολικά πάρκα. Οι δύο σημαντικότεροι τύποι ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα είναι οι «Darrieus» και «Savonius» [10-12].

Προκειμένου η λειτουργία της ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα να εμφανίζει αποτελεσματικότητα, δεν είναι απαραίτητο η μηχανή να προσανατολίζεται κάθε φορά που ο άνεμος αλλάζει κατεύθυνση, σύμφωνα προς την κατεύθυνσή του, καθώς έχει τη δυνατότητα να περιστρέφεται από τη δύναμη του ανέμου από όποια κατεύθυνση και αν προέρχεται. Η επιλογή, επομένως, αυτού του τύπου των ανεμογεννητριών ενδείκνυται σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από μεταβλητότητα στην κατεύθυνση των ανέμων που πνέουν σε αυτές. Σημαντικό πλεονέκτημα, επίσης, των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα, είναι η σχετικά οικονομική αλλά και απλή σχεδίαση του πύργου, εξαιτίας του ότι η ηλεκτρογεννήτρια είναι δυνατό να τοποθετηθεί σε σημείο κοντά στο έδαφος, προσφέροντας με αυτόν τον τρόπο άμεση προσβασιμότητα σε τμήματα που χρειάζονται επιδιόρθωση. Με άλλα λόγια το συγκεκριμένο είδος ανεμογεννήτριας, διαθέτει μερικά χαρακτηριστικά που καθιστούν τη χρήση της, ιδιαίτερα, ελκυστική όσον αφορά τη λειτουργικότητά της.

Εκτός από τα συγκριτικά πλεονεκτήματα, οι ανεμογεννήτριες εμφανίζουν και αρκετά μειονεκτήματα που αποτελούν τροχοπέδη στην ευρύτερη χρήση τους, όπως το γεγονός ότι η απόδοσή τους είναι σχετικά χαμηλή εξαιτίας της διαφορετικής συνεισφοράς του ανέμου στα διάφορα σημεία της περιστροφής τους καθώς και της υψηλής ροπής εκκίνησης που εμφανίζουν με το τελευταίο να καθιστά απαραίτητη μία εξωτερική παρέμβαση για να πραγματοποιηθεί.



Σχήμα 2.2 Δεξιά: ανεμογεννήτρια Darrieus; Αριστερά: ανεμογεννήτρια Savonius

2.2.2.2 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα

Ο συγκεκριμένος τύπος ανεμογεννητριών διαθέτει άξονα περιστροφής τοποθετημένο παράλληλα στη ροή του ανέμου και οριζόντια σε σχέση με το έδαφος (Σχήμα 2.3). Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα διαθέτουν ένα στροφέα τύπου προπέλας, στηριζόμενο σε ένα οριζόντιο άξονα και έχουν δύο ή τρία πτερύγια [12].

Συγκριτικά πλεονεκτήματα αυτού του τύπου ανεμογεννητριών είναι η ευκολία στη συναρμολόγησή τους αλλά και η ευκολία στην έναρξη της περιστροφής τους. Δεν απαιτούνται υψηλές ταχύτητες προκειμένου να αρχίσει η περιστροφή (υψηλός αεροδυναμικός συντελεστής), συμβάλλοντας σε αυξημένη απόδοση λειτουργίας με τη μικρότερη δυνατή προσπάθεια. Εξαιτίας, αυτών των πλεονεκτημάτων, είναι και πιο διαδεδομένη η χρήση τους σε σύγκριση με τις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα.

Εμφανίζουν, όμως και μειονεκτήματα, όπως το αυξημένο κόστος και η δυσκολία στην κατασκευή τους, εξαιτίας της τοποθέτησης της ηλεκτρογεννήτριας και του κιβωτίου ταχυτήτων πάνω στον πύργο όπως και η τοποθέτηση μηχανισμού περιστροφής ανάλογα με την κατεύθυνση του ανέμου.



Σχήμα 2.3 Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα

2.2.3 Αιολικά πάρκα

Τα αιολικά πάρκα, αποτελούν βιομηχανικές εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελούμενα από ανεμογεννήτριες, καλώδια μεταφοράς ρεύματος, μετεωρολογικούς ιστούς, σταθμούς μετασχηματισμού, καθώς και βοηθητικές υποδομές (δρόμοι κλπ.) [13,14]. Ανάλογα με το αν είναι εγκαταστημένα στη στεριά ή στη θάλασσα, τα αιολικά πάρκα χωρίζονται σε χερσαία ή υπεράκτια, αντίστοιχα.

Η χώρα με τη μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι η Κίνα (2017) με ισχύ 188232 MW ξεπερνώντας ήδη από το 2009 τη δεύτερη μεγαλύτερη ηλεκτροπαραγωγό χώρα από αιολική ενέργεια που είναι οι Η.Π.Α. και των οποίων η ισχύς ανέρχεται σε 89077 MW. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η αύξηση της παραγωγής στην περίπτωση της Κίνας ήταν τεράστια, με την ηλεκτροπαραγωγή από αιολική ενέργεια να ανέρχεται σε μόλις 2599 MW το 2006. Η πρώτη δεκάδα των χωρών, με βάση την ηλεκτροπαραγωγή από αιολική ενέργεια για το 2017, συμπληρώνεται από τις Γερμανία, Ινδία, Ισπανία, Ηνωμένο Βασίλειο, Γαλλία, Βραζιλία, Καναδάς και Ιταλία. Συνδυαζόμενες οι χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης σχηματίζουν ισχύ ίση με 169319 MW. Η Ελλάδα καταλαμβάνει την 24^η θέση με 2651 MW [15,16].

Η Ασία (εξαιρουμένων των χωρών της Μέσης Ανατολής) παράγει το ~ 40 % της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από αιολική ενέργεια, η Ευρώπη το ~ 34 %, η Βόρεια Αμερική το 20.5 %, η Λατινική Αμερική και οι χώρες της Καραϊβικής το 2.8 % , η Ωκεανία και τα κρατίδια του Ειρηνικού Ωκεανού το 1.1 %, ενώ η Αφρική και οι χώρες της Μέσης Ανατολής το 0.8 % [16,17]. Όσον αφορά τις χώρες της Μέσης Ανατολής το μικρό ποσοστό οφείλεται στα μεγάλα αποθέματα πετρελαίου και φυσικού αερίου που διαθέτουν, γεγονός που δεν τις οδήγησε στην ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς και στα πολιτικά προβλήματα και στις συγκρούσεις που ταλανίζουν την περιοχή εδώ και δεκαετίες.

2.2.3.1 Χερσαία αιολικά πάρκα

Το πρώτο αιολικό πάρκο που κατασκευάστηκε, παρήγαγε ηλεκτρική ενέργεια 0.6 MW, αποτελούνταν από 20 ανεμογεννήτριες, βρισκόταν στο New Hampshire των Η.Π.Α. και τέθηκε σε λειτουργία τον Δεκέμβριο του 1980 [18]. Αυτή τη στιγμή τα μεγαλύτερα χερσαία αιολικά πάρκα βρίσκονται στην Κίνα, τις Η.Π.Α. και στην Ινδία. Όσον αφορά τα χερσαία αιολικά πάρκα

του Ευρωπαϊκού χώρου, τα μεγαλύτερα βρίσκονται στη Ρουμανία και στο Ηνωμένο Βασίλειο και συγκεκριμένα στη Σκωτία. Στη συνέχεια θα παρατεθούν μερικές πρόσθετες πληροφορίες για τα μεγαλύτερα χερσαία αιολικά πάρκα.

Οι συνεχώς αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις της Κίνας, την έχουν οδηγήσει σε κατασκευή τεράστιων αιολικών πάρκων, που αποτελεί μία αποδοτική και ταυτόχρονα οικολογική επένδυση αφού ταυτόχρονα αντιμετωπίζει μεγάλο πρόβλημα με την περιβαλλοντική ρύπανση. Το μεγαλύτερο αιολικό πάρκο του κόσμου, βρίσκεται στην επαρχία Gansu της Λαϊκής Δημοκρατίας της Κίνας, και το μεγαλύτερο μέρος βρίσκεται υπό κατασκευή. Όταν τεθεί σε πλήρη λειτουργία η παραγωγή του σε ηλεκτρική ενέργεια θα ξεπεράσει τα 6800 MW [19].

Το μεγαλύτερο χερσαίο αιολικό πάρκο των Η.Π.Α. και τρίτο μεγαλύτερο του κόσμου δύναται να παράγει ~ 1600 MW (2013) και βρίσκεται στην Πολιτεία της Καλιφόρνια ενώ το μεγαλύτερο αιολικό πάρκο της Ινδίας με ενεργειακό δυναμικό ίσο με 1500 MW (2016) βρίσκεται στην Πολιτεία Tamil Nadu [20,21].

Το μεγαλύτερο χερσαίο αιολικό πάρκο της Ευρώπης βρίσκεται στη Ρουμανία (Fântânele-Cogealac) ισχύος 600 MW και η κατασκευή του ολοκληρώθηκε το 2012 και το δεύτερο μεγαλύτερο της Ευρώπης βρίσκεται στη Σκωτία ισχύος 540 MW (με την τελευταία προσθήκη να πραγματοποιείται το 2012) [22,23].

2.2.3.2 Υπεράκτια αιολικά πάρκα

Σε αντίθεση με τα μεγαλύτερα χερσαία αιολικά πάρκα που βρίσκονται εκτός Ευρώπης, τα μεγαλύτερα υπεράκτια αιολικά πάρκα βρίσκονται στην Ευρώπη, και πιο συγκεκριμένα στο Ηνωμένο Βασίλειο, στην Ολλανδία, στη Γερμανία και στη Δανία.

Το υπεράκτιο αιολικό πάρκο με τη μεγαλύτερη ισχύ σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο (630 MW) η κατασκευή του οποίου ολοκληρώθηκε το 2013, ονομάζεται London Array και βρίσκεται στα νοτιοανατολικά χωρικά ύδατα της Μεγάλης Βρετανίας. Επίσης, αποτελεί και το αιολικό πάρκο με τη μεγαλύτερη ισχύ στην Ευρώπη, αφού ξεπερνά κατά 30 MW το χερσαίο αιολικό πάρκο της Ρουμανίας, το μεγαλύτερο του τύπου του στον Ευρωπαϊκό χώρο [24].

Το δεύτερο μεγαλύτερο υπεράκτιο αιολικό πάρκο σε παγκόσμια κλίμακα βρίσκεται στην Ολλανδία (Gemini) διαθέτοντας ισχύ 600 MW (2017) και το τρίτο μεγαλύτερο στη Γερμανία (582 MW) (Gode) (2017) [25,26]. Και τα δύο βρίσκονται στη Βόρεια Θάλασσα μία θαλάσσια περιοχή με μεγάλο αιολικό δυναμικό, καθώς χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα ισχυρούς ανέμους.

2.2.3.3 Η Αιολική Ενέργεια στην Ελλάδα

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αιολική ενέργεια στον Ελλαδικό χώρο αυξήθηκε από μόλις 39 MW το 1998 σε 871 MW το 2007, και ανήλθε σε 2651 MW το 2017. Η μεγάλη αύξηση που σημειώθηκε τα τελευταία χρόνια οφείλεται στο στόχο που έχει τεθεί από την Ε.Ε. για κάλυψη του 20 % των ενεργειακών αναγκών κάθε χώρας μέλους, με χρήση ήπιων μορφών ενέργειας έως το 2020 [27]. Εξαιτίας, του μεγάλου αιολικού δυναμικού που διαθέτει η χώρα, η αιολική ενέργεια είναι μία μορφή ενέργειας που δύναται να αξιοποιηθεί άμεσα για να επιτευχθεί αυτό το ποσοστό. Υπάρχουν, ωστόσο, ακόμα μεγάλες δυνατότητες εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας. Το 2017 συνδέθηκαν οι πρώτες ανεμογεννήτριες στην Περιφέρεια της Ηπείρου (2.4 MW), με αποτέλεσμα η αιολική ενέργεια να έχει πλέον παρουσία σε όλες της Περιφέρειες της χώρας. Συγκριτικά η Στερεά Ελλάδα παραμένει στην κορυφή των αιολικών εγκαταστάσεων με 877 MW και ακολουθούν η Πελοπόννησος με 503 MW και η Περιφέρεια Ανατολικής Μακεδονίας – Θράκης με 335 MW. Όσον αφορά τους επιχειρηματικούς ομίλους που δραστηριοποιούνται στην ηλεκτροπαραγωγή από αιολική ενέργεια, οι 5 μεγαλύτεροι, με το ποσοστό της παραγωγής επί του συνολικού να αναφέρεται εντός της παρένθεσης, είναι: η ΤΕΡΝΑ Ενεργειακή με 530,1 MW (20%), ο όμιλος ΕΛΛΑΚΤΩΡ με 256,7 MW (9,7%), η Iberdrola Rokas με 250,7 MW (9,5%), η EDF EN Hellas με 238,2 MW (9%) και, η ENEL Green Power με 200,5 MW (7,6%)

Η Ελλάδα διαθέτει εξαιρετικά πλούσιο αιολικό δυναμικό, σε αρκετές περιοχές της Κρήτης, της Πελοποννήσου, της Εύβοιας και των νησιών του Αιγαίου. Αυτές είναι και οι περιοχές που συναντώνται και τα περισσότερα αιολικά πάρκα. Η περιφέρεια Δυτικής Ελλάδας αν και διαθέτει μικρότερο αιολικό δυναμικό σε σύγκριση με άλλες περιοχές, διαθέτει ένα ισχυρό ηλεκτρικό δίκτυο και το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την ύπαρξη ανεμωδών «νησίδων» (λόφοι, υψώματα κλπ. με εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό) την καθιστούν ενδιαφέρουσα για την ανάπτυξη αιολικών πάρκων. Αιολικά πάρκα υπάρχουν και σε πλήθος νησιών, όπως το Αιολικό

Πάρκο «Μανολάτη - Ξερολίμπα» του Δ.Δ. Διλινάτων Δήμου Αργοστολίου στην Κεφαλονιά. Στο ίδιο νησί έχουν ήδη δημιουργηθεί δύο ακόμη αιολικά πάρκα: το Αιολικό Πάρκο "Αγία Δυνατή" του Δήμου Πυλαρέων, και το Αιολικό Πάρκο "Ημεροβίγλι" στα διοικητικά όρια των Δήμων Αργοστολίου και Πυλαρέων. Με τη λειτουργία των τριών αιολικών πάρκων ο Νομός Κεφαλληνίας τροφοδοτεί το δίκτυο ηλεκτροδότησης της χώρας με σύνολο 75.6 MW ηλεκτρικής ισχύος [28,29].

Κεφάλαιο 3

Μελέτη κεραυνικών πληγμάτων

3.1 Κεραυνός

Ο κεραυνός είναι μία ηλεκτρική εκκένωση μεταξύ νέφους και εδάφους. Όταν δύο σώματα ηλεκτρισμένα με διαφορά δυναμικού πλησιάζουν αρκετά, παράγεται μεταξύ των ηλεκτρική εκκένωση υπό μορφή σπινθήρα. Η μέγιστη απόσταση στην οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί η εν λόγω εκκένωση εξαρτάται από το σχήμα των σωμάτων και από τη διαφορά δυναμικού την οποία παρουσιάζουν. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να συμβεί ηλεκτρική εκκένωση μεταξύ δύο νεφών που βρίσκονται σε διαφορά δυναμικού ή μεταξύ νέφους και εδάφους. Η αναλαμπή η οποία δημιουργείται κατά την εκκένωση, ονομάζεται αστραπή, ο δε κρότος που τη συνοδεύει ονομάζεται βροντή [30].

Τέτοια ηλεκτρικά φαινόμενα παρατηρούνται κατά τη διάρκεια θερμικών ή κυκλωνικών καταιγίδων. Τα νέφη μεταξύ των οποίων λαμβάνουν χώρα οι εκκενώσεις είναι κυρίως οι σωρειτομελανίες, ογκώδη και πυκνά νέφη που η βάση τους σχεδόν ακουμπά στο έδαφος. Οι σωρειτομελανίες, έχουν πολύ μεγάλη κατακόρυφη ανάπτυξη, συνήθως μεγαλύτερη όλων των ειδών των νεφών, ενώ ένα τμήμα της κορυφής τους παρουσιάζει οριζόντια ινώδη μορφή. Η μεγάλη κατακόρυφη ανάπτυξή τους, οφείλεται στα βίαια ανοδικά ρεύματα, που ανυψώνουν τις κορυφές τους ακόμα και ως τα 15000 m [31,32].

Το αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο του εδάφους (5×10^5 C), προκαλεί σε συνθήκες καλοκαιρίας, τη δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου με κατεύθυνση από την ατμόσφαιρα της γης προς το έδαφος, έντασης 0.13 kV/m. Στην ατμόσφαιρα παραμένει ισοδύναμη ποσότητα θετικού φορτίου, της οποίας η πυκνότητα είναι μεγαλύτερη στα χαμηλότερα στρώματα. Το πεδίο της γης μειώνεται προοδευτικά εξαιτίας της ύπαρξης αυτού του θετικού φορτίου. Η ύπαρξη αυτού του πεδίου κατακόρυφης διεύθυνσης προς το έδαφος της γης διαθέτει φορτίο 300 kV σε σύγκριση με τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας [33]. Εξαιτίας της αγωγιμότητας που διαθέτει ο αέρας, λόγω των θετικά ή αρνητικά φορτισμένων σωματιδίων του (οφείλονται σε ραδιενέργεια,

κοσμική ακτινοβολία κλπ.) και της ύπαρξης του ατμοσφαιρικού ηλεκτρικού πεδίου, φορτισμένα ιόντα κινούνται προς κατευθύνσεις αντίθετες. Τα θετικά ιόντα ρέουν προς το έδαφος με πυκνότητα ρεύματος ίση με 2 pA/m^2 , όταν οι καιρικές συνθήκες είναι καλές. Συνεπώς, η εκφόρτιση του εδάφους θα ήταν κάτι το αναμενόμενο, μέσα σε διάστημα μερικών ωρών. Αυτό δε συμβαίνει, εξαιτίας της τροφοδότησης του εδάφους με αρνητικό ισοδύναμο φορτίο μέσω των ηλεκτρισμένων νεφών και των κεραυνών.

3.1.1 Ηλεκτρισμένο νέφος

Η μορφή ενός ηλεκτρισμένου νέφους είναι αυτή ενός διπόλου, που διαθέτει θετικό φορτίο στην κορυφή του και αρνητικό φορτίο στην πλευρά που έχει κατεύθυνση προς το έδαφος, η οποία προκαλεί διαταραχή του πεδίου που υπάρχει κατά τη διάρκεια ομαλών καιρικών συνθηκών, αναστρέφοντας τη φορά του ρεύματος που κατευθύνεται προς το έδαφος. Η κατάσταση του νέφους αλλάζει από ουδέτερη σε ηλεκτρισμένη με την πάροδο μερικών λεπτών. Οι τιμές της πυκνότητας του ηλεκτρικού πεδίου από το έδαφος προς την ατμόσφαιρα, που σχηματίζεται κατά τη διάρκεια των κακών καιρικών συνθηκών, ενδέχεται να φθάσει τα 20 kV/m . Οποιαδήποτε μορφή εκκένωσης διαταράσσει το ηλεκτρικό αυτό πεδίο, το οποίο επανέρχεται στην πρότερη κατάστασή του, με εκθετική καθυστέρηση. Οι προεξοχές του εδάφους προκαλούν ιονισμό, που οφείλεται στην αύξηση της έντασης του πεδίου έως τα 2 kV/m , κατά τον οποίο ελευθερώνονται κατά κύριο λόγο θετικά ιόντα, τα οποία φθάνουν στην επιφάνεια του εδάφους με τη βοήθεια των σταγόνων της βροχής. Μετά τα πρώτα 10 min που διαρκεί η έντονη βροχόπτωση, η πυκνότητα έντασης του ηλεκτρικού πεδίου της επιφάνειας φθάνει τα 3 kV/m . Η συγκεκριμένη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, αποτελεί το όριο πέρα από το οποίο συμβαίνουν ηλεκτρικές εκκενώσεις τόσο στο εσωτερικό του νέφους όσο και με κατεύθυνση το έδαφος. Το χρονικό διάστημα μετά από έναν κεραυνό, χαρακτηρίζεται από ολιγόλεπτη καταρρακτώδη βροχή ή έντονη χαλαζόπτωση. Τα ηλεκτρισμένα νέφη που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους όταν υπερβούν τον όριο των 2 kV/m προκαλούν τον ιονισμό του αέρα από προεξοχές που βρίσκονται στην επιφάνεια του εδάφους, ψηλά κτίρια, δέντρα κλπ.. Λαμβάνοντας υπόψη μία διαμόρφωση εδάφους που θα μπορούσε να χαρακτηριστική κοινή, η μέση πυκνότητα ρεύματος που σχηματίζεται κατά τη διάρκεια της καταιγίδας είναι περίπου $1 - 1.2 \text{ nA/m}^2$ [34].

Τα αρνητικά και θετικά φορτία που βρίσκονται σε περίπου ίσες ποσότητες μέσα στο νέφος, διαχωρίζονται σε ξεχωριστές περιοχές μέσα στο νέφος, που είναι διακεκριμένες, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο, ηλεκτρικό πεδίο τόσο στο εσωτερικό όσο και στο εξωτερικό του νέφους. Ο μηχανισμός που σχηματίζεται και συγκεντρώνεται το ηλεκτρικό φορτίο στα νέφη δεν έχει αποσαφηνιστεί πλήρως, παρά την πληθώρα των θεωριών που έχουν αναπτυχθεί και σχετίζονται είτε με τη φόρτιση των σταγονιδίων που υπάρχουν στα νέφη με τη έναρξη της βροχόπτωσης είτε με τη μεταφορά φορτίου από κατώτερα προς υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς [35].

3.1.2 Παράμετροι κεραυνού

Στη συνέχεια παρατίθενται παράμετροι σχετιζόμενοι με τον κεραυνό, που συμφωνούν με αυτούς του K. Berger [36]:

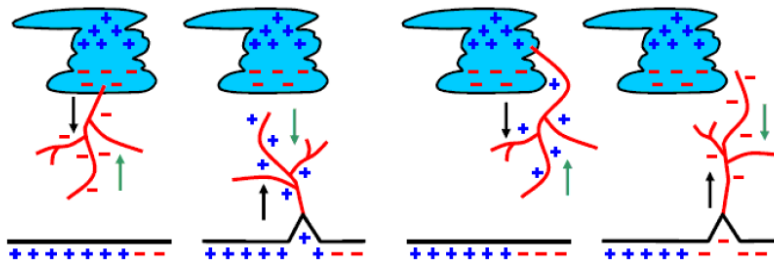
Θετικός κεραυνός ονομάζεται η εκκένωση ενός θετικά φορτισμένου νέφους προς το έδαφος και αρνητικός κεραυνός η εκκένωση ενός αρνητικά φορτισμένου νέφους προς το έδαφος. Με αυτόν τρόπο προσδιορίζεται η πολικότητα ενός κεραυνού. Όσον αφορά την πολικότητα του ρεύματος, κατά τον αρνητικό κεραυνό, ένα αρνητικό ρεύμα κατευθύνεται προς το έδαφος και αντίστροφα.

Σε αυτήν την παράγραφο θα αναλυθεί η κατεύθυνση οχετού προεκκένωσης. Ανάλογα με το αν ο οχετός προεκκένωσης έχει κατεύθυνση από το σύννεφο προς την επιφάνεια του εδάφους ή από το αντίστροφα από το έδαφος προς το σύννεφο, ονομάζεται κατερχόμενος ή ανερχόμενος. Ο ανερχόμενος οχετός σύνδεσης, αναφέρεται σε ηλεκτρική εκκένωση που ξεκινώντας από την επιφάνεια του εδάφους με κατεύθυνση ένα σύννεφο που συναντά ένα κατερχόμενο οχετό σε μια ενδιάμεση θέση μεταξύ της επιφάνειας του εδάφους και του σύννεφου.

Η πολικότητα του οχετού προεκκένωσης είναι ίδια με την πολικότητα του φορτίου της θέσης από την οποία ξεκινά. Λαμβάνοντας αυτό υπόψη, θετικός οχετός προεκκένωσης είναι ο οχετός που ξεκινά από ένα θετικά φορτισμένο νέφος ενώ αρνητικός οχετός προεκκένωσης αυτός που ξεκινά από την επιφάνεια του εδάφους με κατεύθυνση ένα θετικά φορτισμένο νέφος.

3.1.3 Είδη κεραυνού

Δύο αντίθετα φορτισμένα φορτία στο εσωτερικό του ίδιου νέφους ή μεταξύ δύο όμορων νεφών οδηγούν στη δημιουργία υψηλών πεδιακών εντάσεων στο παρεμβαλλόμενο μεταξύ τους διάστημα. Από αυτές τις υψηλές πεδιακές εντάσεις προκαλείται ο κεραυνός, καθώς αυτές είναι ικανές να προκαλέσουν μία εσωτερική εκκένωση του νέφους ή μία εκκένωση μεταξύ δύο σύννεφων. Υψηλές πεδιακές εντάσεις σχηματίζονται μεταξύ της επιφάνειας του εδάφους και του νέφους όταν συγκεντρώνεται φορτίο ενός πρόσημου σε μία θέση του νέφους και του αντίθετου πρόσημου φορτίο σε μία θέση του εδάφους, εξαιτίας του οποίου επάγεται το πρώτο. Σε αυτή τη ζώνη υψηλών πεδιακών εντάσεων, η μεγαλύτερη τιμή της έντασης αναπτύσσεται κοντά στο νέφος ή κοντά στο έδαφος στην περίπτωση που υπάρχει μία προεξοχή στην επιφάνεια του εδάφους. Όταν η υψηλότερη πεδιακή ένταση εμφανίζεται κοντά στο σύννεφο η εκκένωση που θα προκληθεί θα ξεκινήσει από αυτή τη θέση κοντά στο νέφος. Με αυτόν τον τρόπο τέσσερις διαφορετικοί οχετοί προεκκένωσης του κεραυνού μπορούν να προκληθούν. Ο οχετός που αρχίζει από μία προεξοχή του εδάφους και αναπτύσσεται μεταξύ του εδάφους και ενός αρνητικά φορτισμένου νέφους, αποτελεί έναν ανερχόμενο θετικό οχετό, ενώ αυτός που ξεκινά από το έδαφος και κατευθύνεται σε ένα θετικό σύννεφο αποτελεί ανερχόμενο αρνητικό οχετό. Αντίθετα, ο οχετός που κατευθύνεται από ένα αρνητικό νέφος προς την επιφάνεια του εδάφους και ο οχετός που αρχίζει από ένα θετικά φορτισμένο σύννεφο αποτελούν κατερχόμενο αρνητικό και κατερχόμενο θετικό οχετό προεκκένωσης [37]. Όταν ο οχετός προεκκένωσης αναπτυχθεί, με έναν από τους τέσσερις προαναφερθέντες τρόπους, μεταξύ του εδάφους και του νέφους ακολουθεί ο οχετός επιστροφής και με αυτόν τον τρόπο ολοκληρώνεται ο κεραυνός (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1 Τύποι κεραυνών

3.1.4 Πλήγματα κεραυνού

3.1.4.1 Κεραυνικά πλήγματα στο ανθρώπινο σώμα

Το κεραυνικό πλήγμα ενδέχεται να αποβεί μοιραίο για την ανθρώπινη ζωή προκαλώντας την απώλειά της ή σημαντική βλάβη. Υπάρχουν διάφορες υποπεριπτώσεις που ένας κεραυνός μπορεί να πλήξει το ανθρώπινο σώμα. Το άμεσο πλήγμα, σύμφωνα με το οποίο ο άνθρωπος δέχεται απευθείας την εκκένωση. Στην ουσία το ίδιο το ανθρώπινο σώμα είναι η διαδρομή μέσω της οποίας κατευθύνεται η εκκένωση προς το έδαφος. Στην περίπτωση του κεραυνικού πλήγματος από άμεση επαφή, το ανθρώπινο σώμα δέχεται το χτύπημα του κεραυνού από ένα σώμα με το οποίο βρίσκεται σε επαφή και είναι αυτό που δέχεται το πλήγμα. Στην υπερπήδηση, το ανθρώπινο σώμα δέχεται το χτύπημα του κεραυνού από κάποιο σώμα που βρίσκεται κοντά του και πλήττεται από κεραυνό, ως απότοκο της ηλεκτρικής διάσπασης του διάκενου αέρα που βρίσκεται μεταξύ του ανθρώπινου σώματος και του σώματος που δέχεται το κεραυνικό πλήγμα. Άλλη περίπτωση είναι η βηματική τάση, σύμφωνα με την οποία εξαιτίας της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στα κάτω άκρα, λόγω της ακτινικής διάχυσης του ρεύματος στην επιφάνεια του εδάφους, το ανθρώπινο σώμα υπόκειται σε υψηλή τάση. Όταν, το ανθρώπινο σώμα βρίσκεται πλησίον του σημείου του εδάφους που συνέβη το πλήγμα, ενδέχεται υπό προϋποθέσεις να αποτελέσει τμήμα της διαδρομής του ηλεκτρικού τόξου της επιφανειακής επιφάνειας του εδάφους. Τότε το κεραυνικό πλήγμα θεωρείται ότι προήλθε από επιφανειακή διάσπαση του εδάφους και εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, όπως η μορφολογία ή το ποσοστό υγρασίας που υπάρχει στην περιοχή που συνέβη [40]. Στη συνέχεια θα αναλυθούν λεπτομερέστερα τα κεραυνικά πλήγματα σε κατασκευές.

3.1.4.2 Κεραυνικά πλήγματα σε κατασκευές

Οι συνέπειες που ενδέχεται να έχει ένα κεραυνικό πλήγμα σε μία κατασκευή είναι δυνατό να είναι θερμικές, μηχανικές ή ηλεκτρικές [33, 41-44].

Θερμικές επιπτώσεις

Ένας στενός κεντρικός πυρήνας που περιβάλλεται από ένα μεγαλύτερο σχηματισμό κορόνας, αποτελεί τον κεντρικό σχηματισμό του οχετού προεκκένωσης. Η ποσότητα του ρεύματος του

οχητού επιστροφής βρίσκεται κατά κύριο λόγο στον πυρήνα αυτό, διαμέτρου $1 - 2 \text{ cm}^2$ και θερμοκρασία ίση ή μεγαλύτερη των $29730 \text{ }^\circ\text{C}$. Η υψηλή αυτή θερμοκρασία είναι φυσικό επακόλουθο να προκαλέσει ατμοποίηση των υδρατμών, που με τη σειρά του οδηγεί στη δημιουργία τοπικών αλλαγών στην πυκνότητα του αέρα. Αυτό δημιουργεί πρόκληση ηχητικού κύματος που ξεκινώντας από την περιοχή των υπερήχων καταλήγει στη βροντή.

Θεωρείται απαραίτητο στη μελέτη ενός αντικεραυνικού συστήματος να εξεταστούν οι πιθανές συνέπειες ενός κεραυνικού πλήγματος στους αγωγούς του συστήματος εξαιτίας της μεγάλης αύξησης της θερμοκρασίας σε αυτούς, στην διάτρηση ενός λεπτού φύλλου μετάλλου, στην μειωμένη ανθεκτικότητα των μονωτικών υλικών αλλά και σε άλλα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν. Στη συνέχεια παρατίθενται κάποιες πληροφορίες και εξισώσεις που σχετίζονται με τον τρόπο υπολογισμού των μεγεθών των ανωτέρω παραμέτρων.

Η εκφόρτιση ενός μεταλλικού αγωγού που διαρρέεται από ένα μη συνεχές ρεύμα, χαρακτηρίζεται από αύξηση της θερμοκρασίας του η οποία είναι ανάλογη της ποσότητας $\int i^2 dt$. Η μέγιστη τιμή του ανέρχεται στα $10^7 \text{ A}^2 \text{ s}$. Στον υπολογισμό της αύξησης της θερμοκρασίας η διάχυση της θερμότητας θεωρείται αμελητέα εξαιτίας του πολύ μικρού χρόνου που διαρκεί η ροή του ρεύματος. Η ενέργεια που εκλύεται από ένα σώμα αντίστασης R όταν το σώμα αυτό διαρρέεται από ρεύμα $i(t)$ δίνεται από την ακόλουθη σχέση, με μονάδα μέτρησης το J (Joule):

$$W = R \int i^2 dt \quad (3.1)$$

Η αύξηση της θερμοκρασίας δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση με μονάδες μέτρησης K (Kelvin):

$$\Delta\theta = \frac{1}{a} e^{\frac{(\int i^2 dt)a \times \rho}{q^2 \times \gamma \times c_w}} - 1 \quad (3.2)$$

Όπου a ο συντελεστής θερμότητας (K^{-1}), ρ η ειδική αντίσταση του αγωγού ($\Omega \text{ m}$), q η διατομή του αγωγού (m^2), γ η πυκνότητα του υλικού του αγωγού (kg m^{-3}), C_w ο συντελεστής θερμοχωρητικότητας του υλικού του αγωγού ($\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Χαρακτηριστικά παρατίθενται οι τιμές του συντελεστή θερμότητας και της ειδικής αντίστασης του χαλκού, του σιδήρου και του αλουμινίου στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1 Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και ειδική αντίσταση για διάφορα μέταλλα

Μέγεθος	Χαλκός	Σίδηρος	Αλουμίνιο
ρ (Ω m) $\cdot 10^{-9}$	18	120	29
α (K^{-1}) $\cdot 10^{-3}$	4	6	4

Χρησιμοποιώντας, επομένως, τις παραπάνω εξισώσεις και διαφορετικές τιμές της διατομής του αγωγού, είναι δυνατό να υπολογιστεί η αύξηση της θερμοκρασίας ενός αγωγού σε συνάρτηση της διατομής αλλά και της εκλυόμενης ενέργειας. Αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να προκαλέσει βλάβη όταν η πυκνότητα του ρεύματος ενός κεραυνικού πλήγματος εκφορίζεται μέσω του αγωγού του οποίου μία ένωση ενδέχεται να έχει μεγάλη τιμή αντίστασης. Αυτό είναι πιθανό να προκαλέσει τη δημιουργία σπινθήρα μεγάλης ισχύος εξαιτίας της υψηλής τιμής της στιγμιαίας υπέρτασης που εμφανίζει.

Ένα μεταλλικό φύλλο μικρού πάχους (που χρησιμοποιείται συνήθως ως ένα υλικό οροφής ή της επιφάνειας ενός αεροσκάφους) ενδέχεται να τρυπηθεί σε περίπτωση κεραυνικού πλήγματος και η θερμότητα που αναπτύσσεται στο σημείο του πλήγματος είναι ανάλογη της σχέσης 3.3:

$$u \int i \times dt = u \times q \quad (3.3)$$

Όπου u είναι η πτώση τάσης και q το φορτίο η ποσότητα του οποίου είναι ανάλογη με το ρεύμα του κεραυνού.

Ο όγκος του μετάλλου που θα τακεί στο σημείο εκφόρτισης του πλήγματος δίνεται από την εξίσωση 3.4 σε m^3 :

$$V = \frac{W}{\gamma} \times \frac{1}{C_w \Delta\theta + C_s} \quad (3.4)$$

Όπου W η ενέργεια του κεραυνικού πλήγματος (J), γ η πυκνότητα του υλικού ($kg\ m^{-3}$), C_w η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$), $\Delta\theta$ η διαφορά θερμοκρασίας (K) και C_s η ειδική θερμότητα τήξης ($J\ kg^{-1}$).

Αν ένας αγωγός ή ένα υλικό μόνωσης δε χαρακτηρίζεται από τις προβλεπόμενες διαστάσεις (κατάλληλη διατομή), τότε είναι πιθανό ένα κεραυνικό πλήγμα να προκαλέσει μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα τη διάτρησή ή ακόμα και πιθανή ανάφλεξή του.

Μηχανικές επιπτώσεις

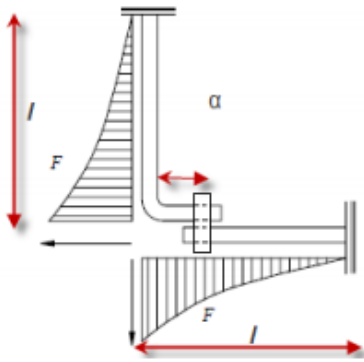
Υπάρχουν μηχανικές επιπτώσεις που σχετίζονται με το κρουστικό κύμα του οχετού επιστροφής και μηχανικές συνέπειες σχετικές με τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις των διαρρεόμενων από ρεύμα αγωγών.

Η εξαιρετικά υψηλή θερμοκρασία του οχετού προεκκένωσης μέσα σε μηδαμινό χρονικό διάστημα της τάξης των μs, προκαλεί τη βίαιη εξάπλωση του αέρα, δημιουργώντας έτσι ένα κύμα πίεσης, που όπως αναφέρθηκε παραπάνω καταλήγει στη βροντή. Αυτή το κρουστικό κύμα αέρα είναι υπεύθυνο για μία σειρά από ζημιές, όπως αυτές που μπορεί να προκληθούν σε σκεπές κατασκευών.

Όσον αφορά τις μηχανικές επιπτώσεις από τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις, αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι δύο παράλληλοι αγωγοί που μοιράζονται την εκφόρτιση του ρεύματος από το κεραυνικό πλήγμα, υφίστανται ελκτικές δυνάμεις ανάλογες του τετραγώνου της τιμής του ρεύματος και αντιστρόφως ανάλογες της μεταξύ τους απόστασης (Σχήμα 3.2). Για αυτό το λόγο, τα στοιχεία που συνθέτουν ένα σύστημα προστασίας δεν τοποθετούνται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους να επιτρέπει τη μεταξύ τους επίδραση, παρ'όλα αυτά, όμως, ενδέχεται να οδηγήσουν σε συγχώνευση πολύκλωνων αγωγών ή ακόμα και σύνθλιψη κοίλων. Η σχέση 3.5 αναφέρεται στις ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις σε N (Newton) που δημιουργούνται από ένα κεραυνικό πλήγμα ρεύματος i , μέσω ενός αγωγού παράλληλων τμημάτων μήκους l και μεταξύ τους απόστασης d :

$$F(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \times i^2(t) \times \frac{l}{d} = 2 \times 10^{-7} \times i^2(t) \times \frac{l}{d} \quad (3.5)$$

Όπου $F(t)$ η ηλεκτρομαγνητική δύναμη (N), $i(t)$ το ρεύμα του πλήγματος (A), μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$), l το μήκος των αγωγών (m) και d η απόσταση μεταξύ των ευθύγραμμων παράλληλων τμημάτων του αγωγού (m).

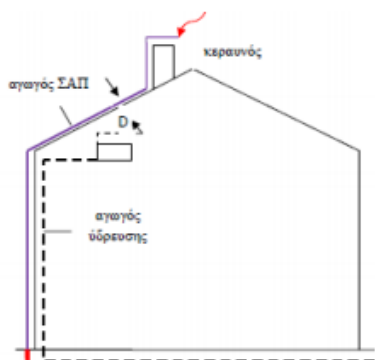


Σχήμα 3.2 Γωνιακή διάταξη αγωγού ενός Συστήματος Αντικεραυνικής Προστασίας (Σ.Α.Π.) συναρτήσει της δύναμης που ασκείται σε αυτόν

Ηλεκτρικές επιπτώσεις

Η σημαντικότερη ηλεκτρική επίπτωση ενός κεραυνικού πλήγματος είναι η εσωτερική διάσπαση που ενδέχεται να λάβει χώρα μεταξύ των αγωγών του αντικεραυνικού συστήματος και διαφόρων εσωτερικών στοιχείων της κατασκευής, ευρέως γνωστή και ως “side flash” (επικίνδυνος σπινθήρας).

Ένα παράδειγμα παρατίθεται στο Σχήμα 3.3, όπου απεικονίζεται το σχήμα μίας κατοικίας που διαθέτει ένα συλλεκτήριο αγωγό στο πιο ψηλό σημείο της που είναι η καμινάδα. Ένας μεταλλικός σωλήνας νερού είναι συνδεδεμένος με μία δεξαμενή νερού και αυτός ο μεταλλικός σωλήνας είναι συνδεδεμένος με έναν αλλο μεταλλικό αγωγό που είναι θαμμένος στο έδαφος.



Σχήμα 3.3 Κεραυνικό πλήγμα σε κατοικία που διαθέτει σύστημα προστασίας και ανεξάρτητο δίκτυο γειωμένων σωληνώσεων νερού

Όταν ο συλλεκτήριος αγωγός της καμινάδας δέχεται κεραυνικό πλήγμα ρεύματος i , τότε αυτό η ποσότητα ρεύματος θα οδηγηθεί σε εκφόρτιση στο έδαφος, διαμέσου του συλλεκτήριου αγωγού, του αγωγού καθόδου και του γειωμένου ηλεκτροδίου. Ο δρόμος αυτός που ακολουθεί το ρεύμα εμφανίζει μία αυτεπαγωγή L και μία αντίσταση οφειλόμενη στη γείωση R . Η κορυφή του αντικεραυνικού συστήματος εμφανίζει διαφορά δυναμικού με μονάδα μέτρησης το V (Volt) με το έδαφος σύμφωνα με την σχέση 3.6:

$$u = i \times R + L \times \frac{di}{dt} \quad (3.6)$$

Εάν η απόσταση μεταξύ των αγωγών προστασίας και της δεξαμενής (τάση διάσπασης διάκενου) έχει μικρότερη τιμή από την τάση u , τότε θα πραγματοποιηθεί εσωτερική διάσπαση των αγωγών συνοδευόμενη από διοχέτευση ενός μεγάλου μέρους του ρεύματος που προέρχεται από το πλήγμα στο έδαφος με αποτελέσματα καταστροφικά.

Μία άλλη διάσταση των καταστροφικών ηλεκτρικών συνεπειών είναι αυτή που σχετίζεται με τη διαφορά δυναμικού που δημιουργείται όταν η κατανομή του ρεύματος αλλά και της τάσης στην επιφάνεια του εδάφους δεν πραγματοποιείται με ομαλό τρόπο. Αυτό συμβαίνει όταν στο έδαφος υπάρχουν προεξοχές (π.χ. ανθρώπινο σώμα, ζώο, κατασκευή). Αυτή η διαφορά δυναμικού προκαλεί τη ροή του ρεύματος μέσω των άκρων και του χαμηλότερου σημείου του.

Ιδιαίτερα σημαντικές είναι οι επιπτώσεις των κεραυνικών πληγμάτων σε συστήματα τηλεπικοινωνιών, υπολογιστές και σύνθετα ηλεκτρονικά συστήματα τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλη ευαισθησία ενώ οι μέθοδοι προστασίας τους είναι αρκετά πολύπλοκες.

3.2 Περιγραφή πλήγματος κεραυνού σε ανεμογεννήτρια

Η αύξηση των κεραυνικών πληγμάτων σε ανεμογεννήτριες τα τελευταία χρόνια, οφείλεται στην αύξηση του αριθμού των ανεμογεννητριών αλλά και του μεγέθους τους. Οι περιοχές που τοποθετούνται οι ανεμογεννήτριες τις καθιστά άμεσα εκτεθειμένες σε κεραυνούς ενώ το μεγάλο ύψος τους σχετίζεται γραμμικά με την αύξηση του κινδύνου κεραυνικού πλήγματος. Το μεγάλο μήκος των πτερυγίων ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα που μπορεί να φθάσει και τα 150 m αυξάνει επιπλέον το κίνδυνο.



Σχήμα 3.4 *Εικόνα ανεμογεννήτριας αμέσως μετά από κεραυνικό πλήγμα*

Όταν το κεραυνικό πλήγμα χτυπήσει τα πτερύγια, το ρεύμα διαρρέει ολόκληρη την κατασκευή και οδηγείται στο έδαφος. Διέρχεται από τα πτερύγια και οδηγείται στην πλήμνη και στον κύριο άξονα και στη συνέχεια διαμέσου του ρουλεμάν του κύριου άξονα αποκτά κατεύθυνση προς τη νασέλλα και τελικά από το ρουλεμάν παρέκκλισης εισέρχεται στον πύργο και καταλήγει στο έδαφος από τη βάση της ανεμογεννήτριας.

Οι καταστροφές στα πτερύγια από κεραυνικά πλήγματα είναι ιδιαίτερα σοβαρές καθώς ο χρόνος επιδιόρθωσης είναι αρκετά μεγάλος όπως και το κόστος. Σύμφωνα με το πρότυπο αντικεραυνικής προστασίας TR IEC 61400-24, τα κεραυνικά πλήγματα σε μη αγωγίμα πτερύγια μπορούν να εξηγηθούν από το ότι η ρύπανση και το νερό καθιστούν αυτά τα πτερύγια, με το πέρασμα του χρόνου, περισσότερο αγωγίμα [45]. Οι συνθήκες ρύπανσης προσδίδουν σε μη-μεταλλικά πτερύγια που είναι κατασκευασμένα μόνο από μονωτικά υλικά, χαρακτηριστικά ως προς την επαφή τους με τον κεραυνό όμοια με τα πτερύγια που είναι κατασκευασμένα από μέταλλο, σύμφωνα με τους Hongo και Yokoyama [46]. Το πρόβλημα είναι εντονότερο στην περίπτωση που η ρύπανση προέρχεται από θαλασσινό νερό, υπογραμμίζοντας τον αυξημένο κίνδυνο για τις ανεμογεννήτριες στα υπεράκτια αιολικά πάρκα ή στα χερσαία αιολικά πάρκα που βρίσκονται σε παραθαλάσσιες περιοχές. Το ρεύμα του κεραυνού μετά από τα πτερύγια διέρχεται από έδρανα κύλισης και υπάρχει η πιθανότητα ένα μέρος της ποσότητας του ρεύματος αυτού να διέλθει από τη γεννήτρια [47]. Αν μέρος του κεραυνικού πλήγματος καταλήξει στη γεννήτρια, η βλάβη που θα υποστεί θα είναι ιδιαίτερα σοβαρή εξαιτίας της μη επαρκούς μόνωσης που διαθέτει λόγω του περιορισμένου χώρου.

Επίσης, ο κεραυνός διαθέτει μεγάλη ποσότητα ενέργειας, η οποία μέσω της αγωγής ζεύξης και της σύζευξης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, εξασφαλίζει πρόσβαση στα ηλεκτρονικά μέρη της ανεμογεννήτριας, ουσιαστικά καταστρέφοντάς τα. Τέλος, τα ανεμόμετρα που είναι τοποθετημένα στην κορυφή της νασέλλας, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα εκτεθειμένα, αποτελούν «στόχο» των κεραυνικών πληγμάτων, τα οποία αποτελούν και την πιο συχνή αιτία καταστροφής τους.

3.3 Στατιστικά στοιχεία βλαβών σε ανεμογεννήτριες και αιολικά πάρκα

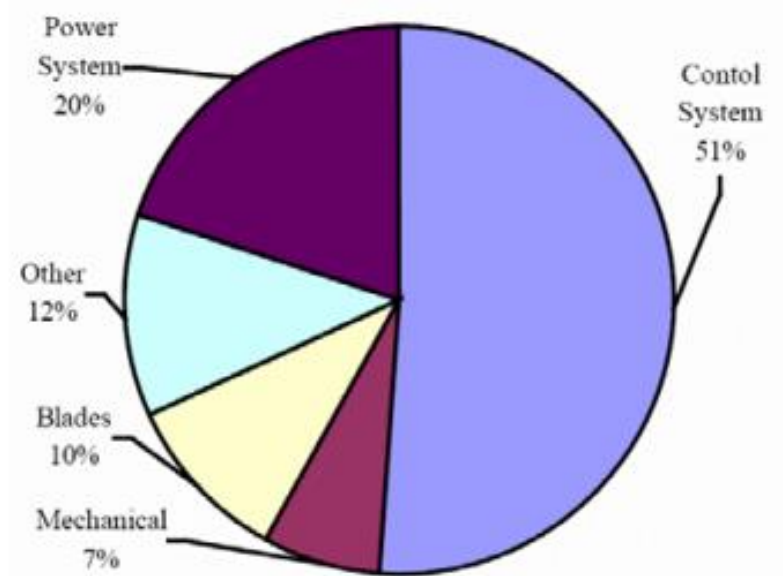
Σύμφωνα με στοιχεία της πρώτης δεκαετίας του 21^{ου} αιώνα μαζί με εκείνα τις αρχές της δεύτερης και αφορούν στατιστικά δεδομένα των ανεμογεννητριών που είναι εγκατεστημένες στην Ευρώπη, περίπου 6 ανεμογεννήτριες στις 100 είναι πιθανό να δεχτούν κεραυνικό πλήγμα [48]. Ο αριθμός αυτός είναι πολύ μεγαλύτερος όταν τα στοιχεία αφορούν χώρες που δέχονται πολύ περισσότερες ηλεκτρικές εκκενώσεις στην έκτασή τους από τον υπάρχοντα μέσο όρο, όπως για παράδειγμα η Ιαπωνία, όπου το ποσοστό αυτό αυξάνεται σε 36 ανεμογεννήτριες ανά 100 [48].

Έπειτα από στοιχεία που προήλθαν από μετρήσεις σε αιολικά πάρκα των Η.Π.Α. [49-52], κάθε ανεμογεννήτρια δέχεται σημαντικό αριθμό κεραυνικών εκκενώσεων κατά τη διάρκεια της «ζωής» της. Η Garolera et al. [53] παρουσίασε μία έρευνα που αφορούσε 304 καταγεγραμμένα περιστατικά κεραυνικών πληγμάτων που προκάλεσαν σοβαρές βλάβες στις ανεμογεννήτριες που βρίσκονταν σε αιολικά πάρκα συνολικής ισχύος 997 MW, εγκατεστημένων στις Πολιτείες του Τέξας, του Κάνσας και του Ιλλινόις. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε σε βάθος πενταετίας και αφορούσε συνολικά 508 ανεμογεννήτριες. Αυτό που προέκυψε είναι ότι κατά μέσο όρο μία ανεμογεννήτρια υφίσταται βλάβη από κεραυνό κάθε 8 περίπου χρόνια.

Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία κατά τη δεκαετία του 1990 περίπου το 80 % των ζητούμενων ασφαλιστρών από βλάβες σε στοιχεία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αιολική ενέργεια σχετιζόταν με κεραυνικά πλήγματα [48,54]. Χαρακτηριστικά παρατίθενται τα αποτελέσματα μίας έρευνας που χρησιμοποιεί δεδομένα από ένα αιολικό πάρκο στη νοτιοδυτική Γερμανία [55] και στην οποία αναφέρεται ότι το 85 % του συνολικού χρόνου διακοπής της λειτουργίας κατά τη διάρκεια ενός χρόνου πλήρους λειτουργίας της συγκεκριμένης αιολικής φάρμας, οφειλόταν σε

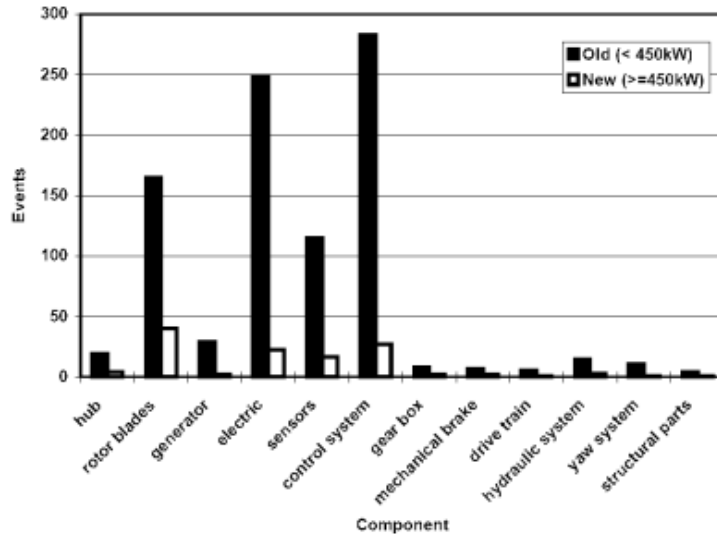
προβλήματα – βλάβες που προέκυψαν στις ανεμογεννήτριες από κεραυνούς. Το εκτιμώμενο κόστος από αυτή τη διακοπή υπολογίζεται ότι ανήλθε στα 250000 \$. Η ίδια πηγή [55] αναφέρει ότι η γερμανική εταιρεία «Energieer-zeugungswerke Helgoland GmbH» ανέστειλε τη λειτουργία του αιολικού πάρκου «Helgoland Island» καθώς η εταιρεία που είχε ασφαλίσει το συγκεκριμένο αιολικό πάρκο αρνήθηκε περαιτέρω αποζημιώσεις που οφείλονται σε κεραυνικά πλήγματα. Έπειτα από 3 χρόνια λειτουργίας οι ζημιές που προέρχονταν από κεραυνικές εκκενώσεις ανέρχονταν σε 540000 \$. Σύμφωνα με πιο πρόσφατες μελέτες το 14 % των ανεμογεννητριών στις ορεινές περιοχές της νότια Γερμανίας καταστρέφονται από κεραυνικά πλήγματα [56,57].

Αρκετές χώρες διατηρούν βάση δεδομένων για τις βλάβες που προκαλούνται από κεραυνικά πλήγματα σε ανεμογεννήτριες. Τις σημαντικότερες βάσεις δεδομένων διαθέτουν η Γερμανία η Σουηδία, οι Η.Π.Α. και η Δανία [57]. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζεται η κατανομή βλαβών στις ανεμογεννήτριες από τη βάση δεδομένων των αιολικών πάρκων της Δανίας.



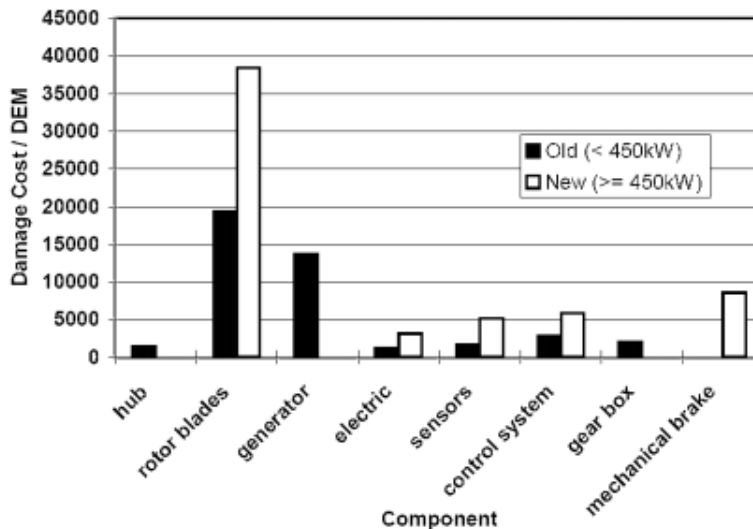
Σχήμα 3.5 Κατανομή βλαβών σε ανεμογεννήτριες (Δανία)

Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται η κατανομή βλαβών στις ανεμογεννήτριες από τη βάση δεδομένων των αιολικών πάρκων της Γερμανίας.



Σχήμα 3.6 Κατανομή βλαβών σε ανεμογεννήτριες (Γερμανία)

Όπως είναι εμφανές ο μεγαλύτερος αριθμός βλαβών αφορά τα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου τόσο μελετώντας τα στατιστικά δεδομένα που αφορούν τη Δανία όσο και από τα αντίστοιχα που σχετίζονται με τη Γερμανία.



Σχήμα 3.7 Μέσο κόστος επιδιόρθωσης της ανεμογεννήτριας ανά διαφορετικό μηχανικό μέρος (Γερμανία)

Παρατηρώντας το ραβδόγραμμα του Σχήματος 3.7 είναι σαφές ότι το μεγαλύτερο κόστος επιδιόρθωσης αφορά τα περύγια και τη γεννήτρια και όσον αφορά τις πιο εξελιγμένες ανεμογεννήτριες το μηχανικό φρένο.

Κεφάλαιο 4

Αντικεραυνικά συστήματα αιολικών πάρκων

Όσον αφορά την αντικεραυνική προστασία των αιολικών πάρκων υπάρχει μικρός αριθμός δημοσιεύσεων και οι χρήσιμες πληροφορίες αναφορικά με τον αριθμό, το είδος και τη συχνότητα των κεραυνικών πλήγμάτων σε ολόκληρη την εγκατάσταση του αιολικού πάρκου είναι ελάχιστες [58-60]. Όπως μικρός είναι και ο διαθέσιμος όγκος πληροφοριών για αντικεραυνική προστασία σε ολόκληρη την εγκατάσταση του αιολικού πάρκου. Σε ένα αιολικό πάρκο το πιθανό σημείο κεραυνικού πλήγματος είναι η ανεμογεννήτρια, εξαιτίας του μεγάλου της ύψους. Η παρούσα εργασία θα ασχοληθεί με την προστασία της ανεμογεννήτριας όσον αφορά το συλλεκτήριο σύστημα και τους αγωγούς καθόδου, οι τεχνολογίες των οποίων δε διαφέρουν πολύ από κατασκευή σε κατασκευή και στη συνέχεια με τις διαφορετικές τεχνολογίες που αφορούν το σύστημα γείωσης ολόκληρου του αιολικού πάρκου που εφαρμόζονται σε διάφορα αιολικά πάρκα ανά τον κόσμο αλλά και στον ελλαδικό χώρο. Πριν όμως από τις τεχνικές λεπτομέρειες θα προηγηθεί η αξιολόγηση του κινδύνου.

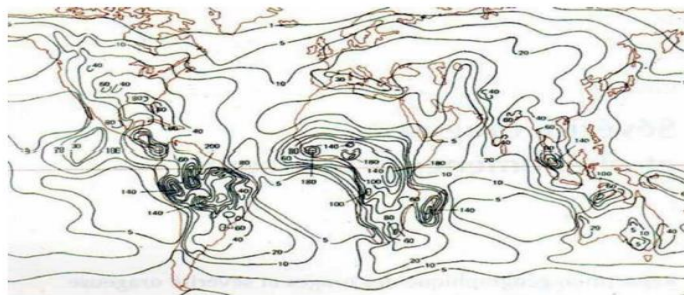
4.1 Αξιολόγηση κινδύνου

Η αξιολόγηση κινδύνου από κεραυνικά πλήγματα σε αιολικά πάρκα περιγράφεται στο πρότυπο IEC 61400-24 [61]. Το 2012 αποφασίστηκε, με βάση το προαναφερθέν πρότυπο, η ανάπτυξη συγκεκριμένης μεθοδολογίας [62-64] για αξιολόγηση του κινδύνου από κεραυνούς σε ανεμογεννήτριες. Χρησιμοποιείται μία απλή εξίσωση προκειμένου να γίνει μία εκτίμηση του ολικού αριθμού των κεραυνών που δέχεται μία ανεμογεννήτρια σε μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο:

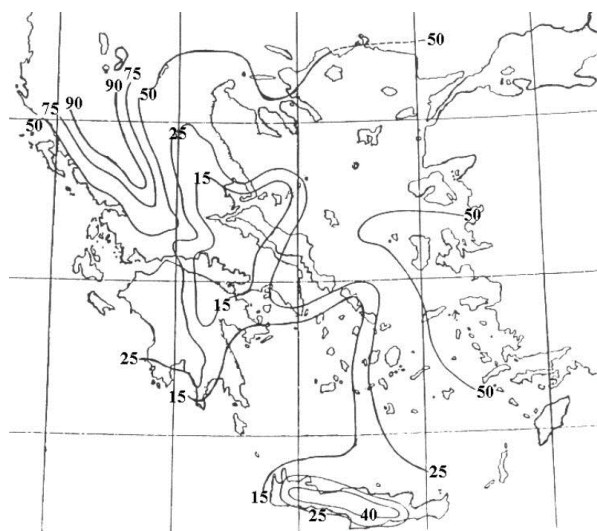
$$N_D = N_g \times A_c \times C_d \quad (4.1)$$

Όπου N_d η μέση ετήσια συχνότητα των άμεσων κεραυνών στην κατασκευή, N_g η μέση πυκνότητα κεραυνών στο έδαφος μετρούμενη σε καταιγίδες/km² ανά έτος, A_c η ισοδύναμη

περιοχή συλλογής της κατασκευής εκφρασμένη σε km², C_d συντελεστής που εξαρτάται από την θέση της κατασκευής, περιβαλλοντικός συντελεστής. Ο συντελεστής N_g προκύπτει από τον ισοκεραυνικό χάρτη μίας περιοχής. Στη συνέχεια, χαρακτηριστικά, παρατίθενται ο παγκόσμιος ισοκεραυνικός χάρτης (Σχ. 4.1) και ο ισοκεραυνικός χάρτης της Ελλάδας (Σχ. 4.2).



Σχήμα 4.1 Παγκόσμιος χάρτης ισοκεραυνικών καμπυλών, σε ημέρες καταιγίδων κατ' έτος



Σχήμα 4.2 Χάρτης ισοκεραυνικών καμπυλών, σε ημέρες καταιγίδων κατ' έτος για την Ελλάδα

Στην παραπάνω εξίσωση εισήχθησαν νέοι παράμετροι οδηγώντας στην ακόλουθη εξίσωση:

$$N_D = N_{sg} \times N_g \times A_c \times (C_{dc} \times C_{wl} \times C_{hasl}) \quad (4.2)$$

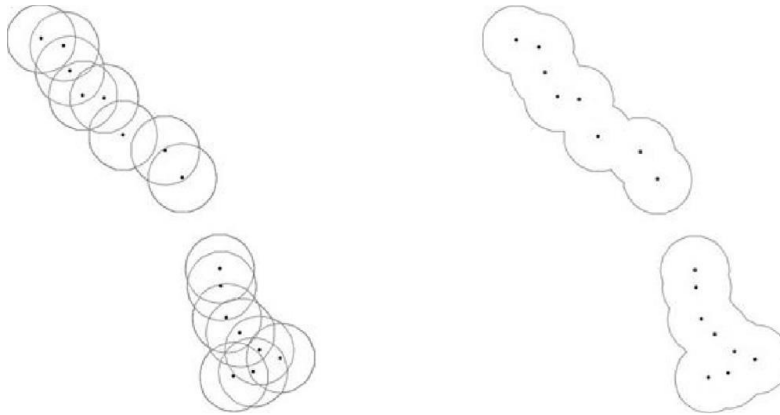
Όπου ο συντελεστής N_{sg} αναφέρεται στον αριθμό τερματισμού των κεραυνικών πληγμάτων, ενώ εισάγεται και ο περιβαλλοντικός παράγοντας ο οποίος χωρίζεται σε C_{dc} το οποίο αφορά την πολυπλοκότητα του εδάφους, στο C_{wl} για τους κεραυνούς της χειμερινής περιόδου και τέλος στο C_{hasl} για το ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας. Με αυτόν τον τρόπο ο αριθμός των

κεραυνικών πληγμάτων κατά τη διάρκεια μίας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου μπορεί να υπολογιστεί με σχετική ακρίβεια.

Αναλύοντας λίγο περισσότερο τις παραμέτρους, το N_{sg} , ουσιαστικά αναφέρεται στην πιθανότητα μία εκκένωση να έχει περισσότερα από ένα σημεία τερματισμού. Γενικά σύμφωνα με το πρότυπο της IEC η συγκεκριμένη παράμετρος είναι λογικό να λαμβάνει μία τιμή ίση με 2.

Όπως έχει προκύψει από άλλες εργασίες [62, 63-65], η μέση πυκνότητα κεραυνών στο έδαφος (N_{sg}) εξαρτάται από δύο παράγοντες, την αποτελεσματικότητα της ανίχνευσης των κεραυνικών πληγμάτων στο έδαφος και το μέγεθος του πλέγματος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της πυκνότητας εδάφους. Διαπιστώθηκε ότι για ένα πλέγμα αναφοράς 5×5 km, η μέση εκατοστιαία μεταβολή της πυκνότητας αστραπής ήταν 10 %, 23 % και 30 % καθώς το μέγεθος του πλέγματος αυξήθηκε στα 10×10 , 20×20 και 30×30 km αντίστοιχα. Έτσι, οποιαδήποτε μεθοδολογία πρέπει να λαμβάνει υπόψη την διακύμανση των διαφορετικών μεγεθών πλέγματος.

Η περιοχή συλλογής A_c ορίζεται από το πρότυπο της IEC ως μία περιφέρεια με ακτίνα τριπλάσια από το μέγεθος της ανεμογεννήτριας. Η συγκεκριμένη παράμετρος έχει προσαρμοστεί στις ανεμογεννήτριες από το πρότυπο της IEC για κτιριακές εγκαταστάσεις [66]. Στην περίπτωση μίας μεμονωμένης ανεμογεννήτριας η περιοχή συλλογής ορίζεται, όπως προαναφέρθηκε ως ένας κύκλος με περιφέρεια 3 φορές το ύψος της, ωστόσο στις αιολικές μονάδες παραγωγής ενέργειας οι οποίες αποτελούνται από πολλαπλές ανεμογεννήτριες, οι περιοχές συλλογής αλληλεπικαλύπτονται η μία με την άλλη. Σε αυτές τις περιπτώσεις το πρότυπο της IEC αναφέρει ότι η περιοχή συλλογής πρέπει να προκύπτει από τις συνολικές διασταυρώσεις με την αναλογία ύψους ακτίνας να είναι 1:3, όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 4.3.



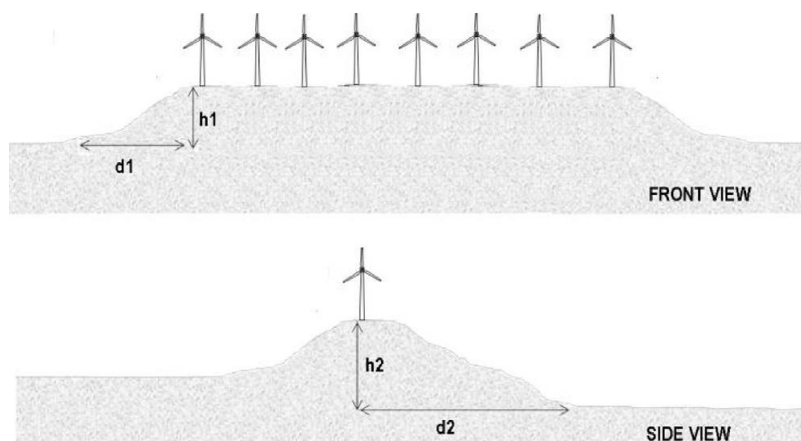
Σχήμα 4.3 Περιοχή συλλογής ενός αιολικού πάρκου χωρίς να ληφθεί υπόψη η αλληλεπικάλυψη (δεξιά) και λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπικάλυψη (αριστερά). Οι μαύρες τελείες αντιστοιχούν στις ανεμογεννήτριες

Σε τέτοιου είδους αξιολογήσεις, ο περιβαλλοντικός παράγοντας εμφανίζει αρκετές δυσκολίες όσον αφορά την εκτίμηση και την κατανόησή του. Προκειμένου να διευκολυνθεί ο προσδιορισμός του, χωρίζεται σε τρεις υπο-παράγοντες: τη πολυπλοκότητα του τοπικού εδάφους C_{dc} , τη χειμερινή αστραπή C_{wl} και το ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας C_{hasl} .

Ο πρώτος όρος C_{dc} , αφορά το σχήμα και το ύψος της θέσης όπου ανεγέρθηκε το αιολικό πάρκο. Ο βαθμός πολυπλοκότητας του βουνού ή του λόφου πρέπει να ποσοτικοποιηθούν. Όπως είναι γνωστό από τη σχετιζόμενη με κεραυνούς έρευνα το σχήμα του βουνού έχει μεγάλη επίδραση στη διαμόρφωση των τοπικών ηλεκτρικών πεδίων. Ο ενδεδειγμένος τρόπος είναι ο υπολογισμός της κλίσης του εδάφους και η χρήση βιβλιογραφικών τιμών για την ποσοτικοποίησή του. Το Σχήμα 4.4 παρουσιάζει το παράδειγμα ενός αιολικού πάρκου που αποτελείται από 8 ανεμογεννήτριες. Όπως είναι εμφανές, οι διαφορές οπτικές γωνίες που μπορεί κάποιος να το μελετήσει, μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικές κλίσεις του εδάφους $h1/d1$ και $h2/d2$.

Όσον αφορά τον υπο-παράγοντα που σχετίζεται από το ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας C_{hasl} , και πάλι το ύψος του εδάφους επηρεάζει σημαντικά την τοπική δραστηριότητα του ανέμου σε μία αιολική φάρμα.

Τέλος η δραστηριότητα της χειμερινής αστραπής C_{wl} ενδέχεται να έχει μεγάλο αντίκτυπο στο τελικό κεραυνικό πλήγμα, εξαρτώμενο σε μεγάλο βαθμό από την τοποθεσία του αιολικού πάρκου.



Σχήμα 4.4 Πολυπλοκότητα εδάφους από διαφορετικές οπτικές γωνίες για το ίδιο αιολικό πάρκο

Λαμβάνοντας υπόψη τις ανωτέρω πληροφορίες, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι δεν υπάρχει μία ιδανική τοποθεσία για αιολική εγκατάσταση, αφού οι παράγοντες που υπεισέρχονται επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τόσο την τελική απόδοση όσο και την άυξηση του κινδύνου.

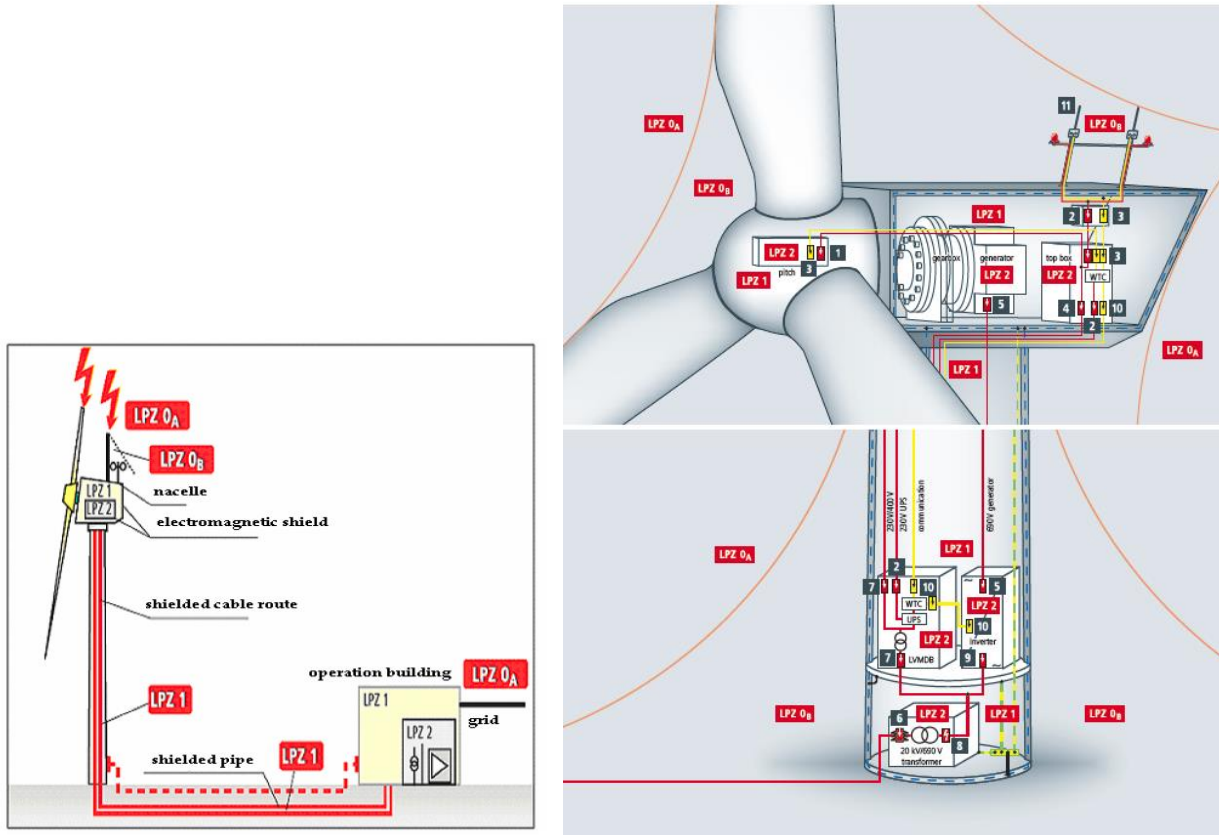
4.2 Ανάλυση Συστήματος Αντικεραυνικής Προστασίας (ΣΑΠ)

Για την ελληνική επικράτεια, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ 1412 [67], ένα σύστημα αντικεραυνικής προστασίας αποτελείται από το εξωτερικό ΣΑΠ και το εσωτερικό. Το εξωτερικό ΣΑΠ αποτελείται από το συλλεκτήριο σύστημα, τους αγωγούς καθόδου και το σύστημα γείωσης. Το εσωτερικό ΣΑΠ αποτελείται από το ισοδύναμο δυναμικό και την προστασία υπέρτασης, που σχετίζονται κυρίως με τα μέτρα προστασίας των ηλεκτρονικών και των συστημάτων ελέγχου της ανεμογεννήτριας. Πριν από την εφαρμογή όλων των ανωτέρω, προηγείται ο σχεδιασμός των ζωνών αντικεραυνικής προστασίας των ανεμογεννητριών.

4.2.1 Ζώνες αντικεραυνικής προστασίας

Οι ζώνες προστασίας μίας ανεμογεννήτριας είναι συνήθως τρεις. Η πρώτη ζώνη προστασίας (LPZ-0) αναφέρεται στην προστασία από κεραυνικό πλήγμα στα πτερύγια και στο ανεμόμετρο,

η δεύτερη (LPZ-1) στο εσωτερικό τμήμα του ανεμοστρόβιλου και η τρίτη (LPZ-2) στην προστασία του ηλεκτρονικού εξοπλισμού με χρήση ηλεκτρονικής ασπίδας [61]. Οι ζώνες αυτές παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5 Ζώνες αντικεραυνικής προστασίας στο εξωτερικό (αριστερά) και στο εσωτερικό της ανεμογεννήτριας (δεξιά)

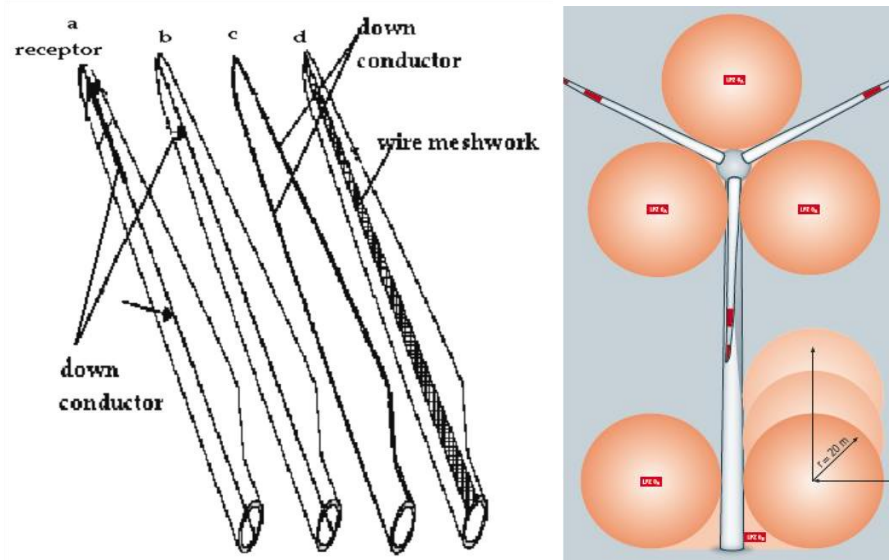
Όπως είναι κατανοητό και από την ονομασία τους οι ζώνες αντικεραυνικής προστασίας ορίζονται σε συνάρτηση του αν είναι πιθανή μία άμεση πτώση κεραυνού, το μέγεθος του κεραυνικού πλήγματος, όπως επίσης και η αρχιτεκτονική της κατασκευής του ανεμοστρόβιλου. Στον πίνακα 4.1 παρατίθεται ο τρόπος καθορισμού των ζωνών.

Πίνακας 4.1 Τρόπος καθορισμού ζωνών προστασίας

Ζώνη προστασίας	Τρόπος καθορισμού
LPZ 0 _A	Στοιχεία εκτεθειμένα σε άμεσο κεραυνικό πλήγμα, πλήρες ρεύμα κεραυνού, ισχυρό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο
LPZ 0 _B	Στοιχεία μη εκτεθειμένα σε άμεσο κεραυνικό πλήγμα, πλήρες ρεύμα κεραυνού, ισχυρό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο
LPZ 1	Στοιχεία μη εκτεθειμένα σε άμεσο κεραυνικό πλήγμα, μειωμένο ρεύμα κεραυνού, εξασθενημένο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο
LPZ 2	Στοιχεία μη εκτεθειμένα σε άμεσο κεραυνικό πλήγμα, περαιτέρω μείωση του ρεύματος κεραυνού και εξασθένηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου

4.2.2 Υποδοχείς πτερυγίων

Οι υποδοχείς πτερυγίων αποτελούν το συλλεκτήριο σύστημα της ανεμογεννήτριας. Αυτό το σύστημα αποτελείται, συνήθως, από έναν ατσάλινο υποδοχέα σε κάθε πλευρά του πτερυγίου σε απόσταση 20 – 25 m από τον περιστρεφόμενο άξονα. Το πτερύγιο αποτελείται από ένα σύρμα των 50 mm² από σίδηρο που είναι τοποθετημένο στον ιστό του, συνδέοντας τη ρίζα του με τους υποδοχείς (Σχήμα 4.6). Η χρήση του σιδήρου ενδείκνυται εξαιτίας της αυξημένης αντοχής που εμφανίζει σε διαφορετικές καιρικές συνθήκες, όπως βροχή και υγρασία που οδηγούν σε διάβρωση. Στη βάση του πτερυγίου το σύρμα τερματίζεται διοχετεύοντας το πλήγμα χωρίς να προκαλεί βλάβες στον κορμό.



Σχήμα 4.6 Διάφοροι τύποι προστασίας περυγίου (δεξιά) και μοντέλο κυλιόμενης σφαίρας (αριστερά)

Αναφέροντας κάποια πράγματα πιο γενικά, το συλλεκτήριο σύστημα μπορεί να σχεδιασθεί ανεξάρτητα ή σε συνδυασμό σύμφωνα με τις παρακάτω μεθόδους:

1. Γωνία προστασίας
2. Κυλιόμενης σφαίρας (Σχήμα 4.6)
3. Βρόχου

Το συλλεκτήριο σύστημα μπορεί να αποτελείται από οποιοδήποτε συνδυασμό των ακόλουθων στοιχείων :

1. Ράβδων, η τοποθέτησή των οποίων γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχουν προστασία υπό μία γωνία η οποία εξαρτάται από την υψομετρική διαφορά μεταξύ αυτών και της υπό προστασία επιφάνειας και της στάθμης προστασίας.
2. Τεταμένων συρμάτων, τα μεγέθη και η κατασκευή των οποίων ισχύουν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των μεταλλικών ράβδων.
3. Πλέγματος αγωγών. Πλέγμα, από αγωγούς συνήθως κυκλικής διατομής, οι οποίοι τοποθετούνται επί του δώματος ή επί της στέγης ή επί των περυγίων της ανεμογεννήτριας.

4.2.3 Αγωγοί καθόδου

Όπως προαναφέρθηκε, σκοπός των αγωγών καθόδου είναι η ασφαλής διοχέτευση του κεραυνικού ρεύματος στο σύστημα γείωσης.

Τοποθετούνται είτε περιμετρικά στις εξωτερικές παράπλευρες επιφάνειες του κτιρίου, είτε εγκιβωτισμένοι στο σκυρόδεμα των υποστυλωμάτων της κατασκευής. Οι αγωγοί που χρησιμοποιούνται είναι ιδίου υλικού με τους αγωγούς του συλλεκτηρίου. Η στήριξη των αγωγών καθόδου γίνεται κατά ανάλογο τρόπο με την στήριξη των αγωγών του συλλεκτηρίου.

Η διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσει το ρεύμα να χαρακτηρίζεται από τη μικρότερη δυνατή αυτεπαγωγή, ως εκ τούτου να είναι σύντομη, συνεχής και κατακόρυφη. Επίσης, να μη διέρχεται πλησίον ευαίσθητων συσκευών. Για τις περισσότερες ανεμογεννήτριες ο ίδιος ο χαλύβδινος πύργος είναι η διαδρομή με τη μικρότερη αυτεπαγωγή και επομένως χρησιμοποιείται ως αγωγός καθόδου. Όταν αυτό δε συμβαίνει, επιλέγονται τρεις αγωγοί καθόδου, προκειμένου το ρεύμα να επιμερίζεται σε πολλές οδούς όδευσης, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο την πιθανότητα εμφάνισης δευτερογενών υπερπηδήσεων και πρόσθετων ηλεκτρομαγνητικών επιδράσεων. Πρέπει να είναι καλά στερεωμένοι και να διαθέτουν μικρό αριθμό συνδέσεων. Ο αγωγός καθόδου στη βάση του πύργου συνδέεται με το σύστημα γείωσης που βρίσκεται στα θεμέλια του πύργου [68].

4.2.4 Σύστημα γείωσης

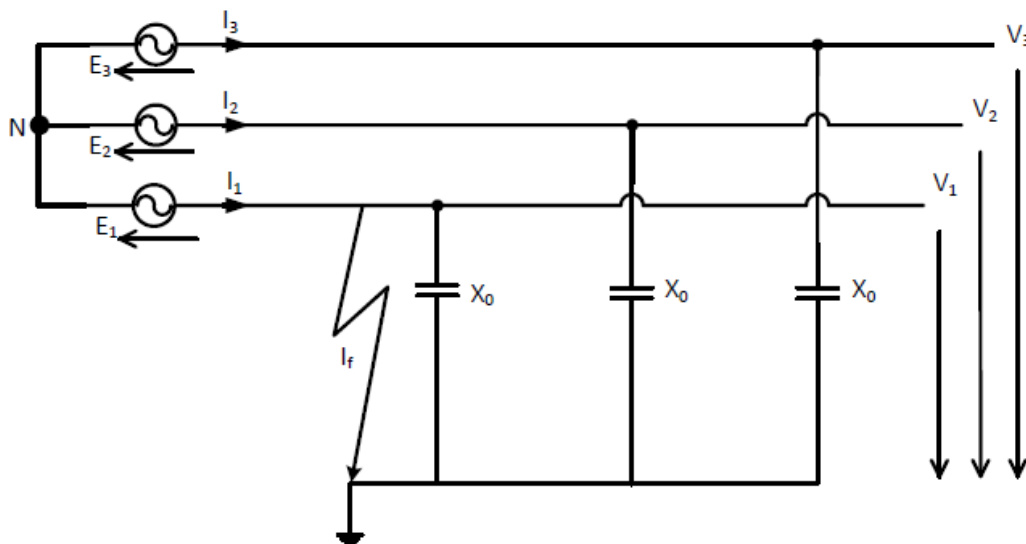
Το αντικεραυνικό σύστημα προστασίας των αιολικών πάρκων διαφέρει στις διάφορες αιολικές εγκαταστάσεις παραγωγής ισχύος, κυρίως όσον αφορά το σύστημα γείωσης καθώς τα συλλεκτήρια συστήματα και οι αγωγοί καθόδου, παρά τις διαφορετικές παραλλαγές δε διαφέρουν πολύ ως προς τη φιλοσοφία κατασκευής και εφαρμογής τους αφού αφορούν κατά κύριο λόγο την ίδια την ανεμογεννήτρια. Υπάρχει πλούσιο βιβλιογραφικό υλικό σχετιζόμενο με την αντικεραυνική προστασία ανεμογεννητριών αλλά σχετικά πολύ περιορισμένο αναφορικά με την αντικεραυνική προστασία των αιολικών πάρκων, κυρίως λόγω της μικρής διαθεσιμότητας πληροφοριών σχετικών με το είδος του συστήματος γείωσης που χρησιμοποιεί η κάθε αιολική φάρμα. Παρ' όλα αυτά, στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε μία μεγάλη προσπάθεια συλλογής πληροφοριών που να σχετίζονται με τις διάφορες τεχνολογίες που υπάρχουν για τα

συστήματα γείωσης σε αιολικές εγκαταστάσεις, αλλά και ποια τεχνολογία έχει εφαρμοστεί σε διάφορα αιολικά πάρκα ανά τον κόσμο. Επίσης, γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στην επικρατέστερη τεχνολογία συστήματος γείωσης στον Ελλαδικό χώρο.

4.2.4.1 Μέθοδοι γείωσης

Απομονωμένο Ουδέτερο Σύστημα Γείωσης (Isolated Neutral Earthed System)

Όταν το σύστημα είναι απομονωμένο, αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει καμία εκ προθέσεως σύνδεση μεταξύ του ουδέτερου συστήματος και της γης. Υπάρχει όμως χωρητικότητα μεταξύ της μίας φάσης και της άλλης αλλά και μεταξύ της γης X_0 (Σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.7 Ισοδύναμο κύκλωμα για ένα απομονωμένο σύστημα γείωσης

Η χωρητική σύζευξη μεταξύ μεταξύ δύο φάσεων έχει πολύ μικρή επίδρασης στο σύστημα γείωσης και για αυτό το λόγο μπορεί να αγνοηθεί.

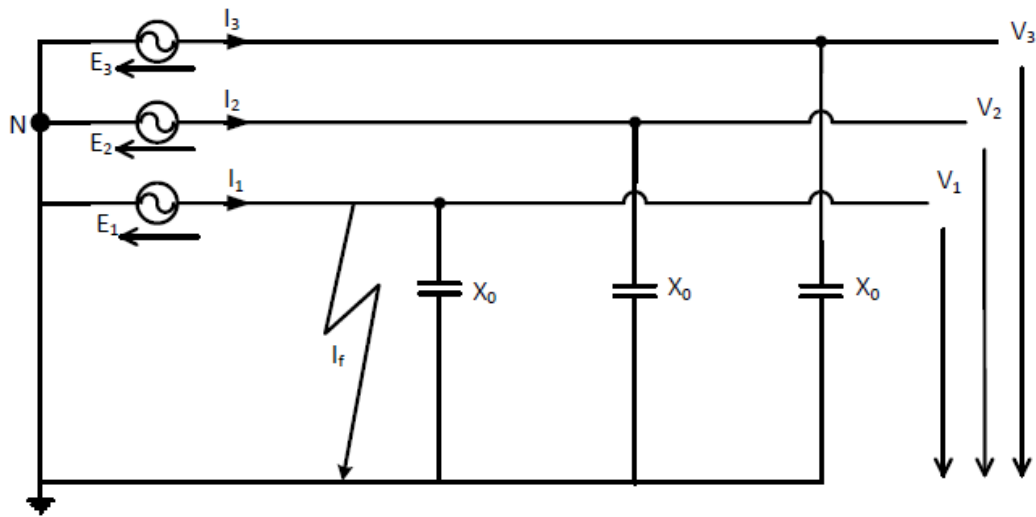
Τα απομονωμένα συστήματα δε συνιστώνται πλέον για χρήση σε συστήματα ισχύος, εξαιτίας της εμφάνισης μεταβατικών υπερτάσεων. Σε ένα απομονωμένο σύστημα γείωσης υπάρχει η πιθανότητα εμφάνισης παροδικών υπερτάσεων σε όλη την έκταση του συστήματος επιπρόσθετα των επαναλαμβανόμενων βλαβών γείωσης. Η παροδική εμφάνιση αυτών των υπερτάσεων ενδέχεται να προκαλέσουν σημαντικές βλάβες στη μόνωση. Για να αποφευχθεί η παροδική

εμφάνιση υπέρτασης, το απομονωμένο σύστημα πρέπει να είναι γειωμένο με ένα σύστημα σταθερής γείωσης ή με ένα σύστημα γείωσης αντίστασης [69]. Ένα άλλο μειονέκτημα του απομονωμένου συστήματος γείωσης, εκτός από τα υψηλά μεταβατικά φαινόμενα, είναι ότι η τάση μεταξύ δύο υγείων γραμμών αυξάνεται και επηρεάζει την εκτίμηση των προστατευτικών διατάξεων επιτάχυνσης, όταν συμβαίνει κάποιο σφάλμα στη λειτουργία του συστήματος [70].

Το απομονωμένο σύστημα διαθέτει, όμως, και σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά τη λειτουργία του. Ένα πλεονέκτημά του είναι ότι στην περίπτωση σφάλματος λειτουργίας, μετριάξει το σφάλμα στην πυκνότητα ρεύματος με την αρωγή της χωρητικότητας μεταξύ των γραμμών και του εδάφους. Με αυτόν τον τρόπο η ποσότητα ρεύματος περιορίζεται σε ένα κλάσμα του Ampere (A) για μικρά συστήματα ισχύος και μερικές δεκάδες A για μεγαλύτερα συστήματα [70].

Στερεά Ουδέτερο Σύστημα Γείωσης (Solidly Neutral Earthed System)

Η συνηθέστερη μέθοδος γείωσης που χρησιμοποιείται στα βιομηχανικά/εμπορικά συστήματα παραγωγής ισχύος είναι το στερεό σύστημα γείωσης [71] και συνιστάται για συστήματα με τάση μικρότερη των 600 V ή μεγαλύτερη των 15 kV [69]. Η μορφή ενός τέτοιου συστήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8 Ισοδύναμο κύκλωμα για ένα στερεά ουδέτερο σύστημα γείωσης

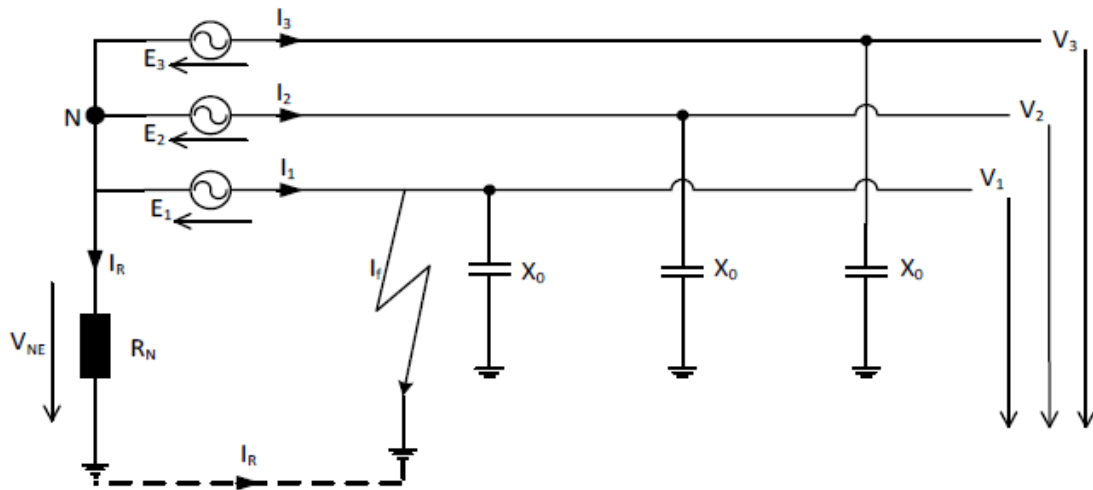
Προκειμένου να γίνουν αντιληπτά τα πλεονεκτήματα ενός στερεού συστήματος γείωσης, πρέπει πρώτα να προσδιοριστεί ο βαθμός γείωσης που παρέχει το συγκεκριμένο σύστημα. Αυτή η εκτίμηση μπορεί να γίνει από τη σύγκριση του μεγέθους του ρεύματος σφάλματος-γείωσης (ground-fault current) με το τριφασικό ρεύμα σφάλματος (three phase-fault current). Το ρεύμα σφάλματος-γείωσης πρέπει να είναι τουλάχιστον το 60% του τριφασικού ρεύματος σφάλματος για να είναι αποτελεσματικό το σύστημα γείωσης. Αυτό μπορεί επίσης, να εκφραστεί σε όρους αντίδρασης (reactance) και αντίστασης (resistance). Για να επιτευχθεί η εγκατάσταση ενός αποτελεσματικού συστήματος γείωσης πρέπει να πληρούνται δύο προϋποθέσεις: $R_0 \leq X_1$ και $X_0 \leq 3X_1$, όπου R_0 και X_0 είναι η μηδενικής ακολουθίας αντίσταση/αντίδραση (zero-sequence resistance/reactance) της γεννήτριας ή του μετασχηματιστή και X_1 είναι η αντίδραση θετικής ακολουθίας (positive sequence reactance). Εάν η μηδενικής ακολουθίας είναι πολύ μεγάλη συγκρινόμενη με την αντίδραση θετικής ακολουθίας, θα υπάρξει εμφάνιση παροδικών υπερτάσεων στο σύστημα. Εάν το R_0 έχει πολύ μεγάλη τιμή, η επιθυμητή καταστολή της εμφανιζόμενης τάσης ενδέχεται να μην ολοκληρωθεί [69].

Κανονικά η σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας (zero-sequence impedance) των γεννητριών και των μετασχηματιστών που χρησιμοποιείται σε ένα τυπικό σύστημα παραγωγής ισχύος, είναι πολύ χαμηλότερη από τη σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας (positive-sequence impedance). Εντούτοις, μπορεί κάποιες φορές να είναι μεγαλύτερη εάν κάποιιοι μετασχηματιστές/γεννήτριες που είναι συνδεδεμένοι παράλληλα τροφοδοτούν το σύστημα ισχύος [69].

Ο συντελεστής γείωσης (coefficient of grounding, COG), ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ του δυναμικού γραμμής-εδάφους (line-to-earth voltage) και του δυναμικού γραμμής (line voltage) [70]. Η χρησιμοποίηση σταθερού συστήματος γείωσης, έχει ως αποτέλεσμα ο συντελεστής γείωσης να είναι κάτω από 80%, που συνεπάγεται ότι το σύστημα διαθέτει καλό έλεγχο τόσο των παροδικών όσο και των προσωρινών υπερτάσεων. Εξαιτίας του γεγονότος ότι η σύνθετη αντίσταση του εδάφους σε ένα σταθερό σύστημα γείωσης είναι πολύ μικρή, το ρεύμα σφάλματος γίνεται πολύ μεγάλο. Αυτό είναι ένα πλεονέκτημα που παρέχει η λειτουργία του συγκεκριμένου συστήματος γείωσης, καθώς διευκολύνει τον υπολογισμό του, αλλά ταυτόχρονα αποτελεί και μειονέκτημα γιατί μεγάλη τιμή πυκνότητας ρεύματος συνεπάγεται αυξημένη πίεση στον τεχνικό εξοπλισμό, που ενδέχεται να προκαλέσει διάφορα προβλήματα [70].

Σύστημα Γείωσης με Αντίσταση (Resistance Earthed System)

Σε αυτό το σύστημα γείωσης, ένας αντιστάτης είναι συνδεδεμένος μεταξύ του ουδέτερου σημείου του μετασηματιστής και του εδάφους (Σχήμα 4.9).



Σχήμα 4.9 Ισοδύναμο κύκλωμα για ένα σύστημα γείωσης με αντίσταση

Ένα σύστημα γείωσης με αντίσταση μειώνει το ρεύμα σφάλματος-γείωσης σε ένα διαχειρίσιμο επίπεδο που εξαρτάται από την τιμή του αντιστάτη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αποφυγή ζημιών του στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, την αποτροπή πιθανής ηλεκτροπληξίας, τη μείωση της μηχανικής τάσης του ηλεκτρικού συστήματος που προκαλεί ρεύματα σφάλματος, μειωμένη πυκνότητα ρεύματος όσον αφορά τον ακριβό εξοπλισμό και περιορισμό της εμφάνισης παροδικών υπερτάσεων λόγω της μείωσης των σφαλμάτων γείωσης σε ποσοστό 250% του κανονικού επιπέδου του δυναμικού. Υπάρχουν δύο είδη συστημάτων γείωσης με αντίσταση, το χαμηλής αντίστασης σύστημα (low-resistance earthed system) και το υψηλής αντίστασης σύστημα (high-resistance earthed system) [69,72].

Σε ένα σύστημα υψηλής αντίστασης, το ρεύμα σφάλματος-γείωσης λαμβάνει τιμή μικρότερη των 10 A. Το σύστημα γείωσης υψηλής αντίστασης πρέπει να σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε η τιμή του ρεύματος I_R που διέρχεται μέσω του αντιστάτη να είναι ίση ή λίγο μεγαλύτερη από το ρεύμα που οφείλεται στο συνολικό χωρητικό φορτίο, $3I_0$. Η ωμική τιμή του αντιστάτη πρέπει να είναι $R_N \leq X_0/3$, όπου X_0 είναι η αντίδραση που οφείλεται στη χωρητικότητα μεταξύ της φάσης και του εδάφους (γείωσης). Η συγκεκριμένη μέθοδος γείωσης είναι κατάλληλη για συστήματα

χαμηλής τάσης αλλά βρίσκει εφαρμογή και σε συστήματα μέσης τάσης [73]. Στο πρότυπο IEEE 141-1993 αναφέρεται ότι: “Οι έρευνες συνιστούν γείωση υψηλής αντίστασης που πρέπει να περιορίζεται σε συστήματα 5 kV ή χαμηλότερης τάσης με ρεύματα που να λαμβάνουν τιμή 5.5 A ή μικρότερη και δεν πρέπει να επιχειρείται η εφαρμογή της σε συστήματα 15 kV, εκτός αν συνοδεύεται με χρήση κατάλληλης λειτουργίας γείωσης με αναμετάδοση” [72].

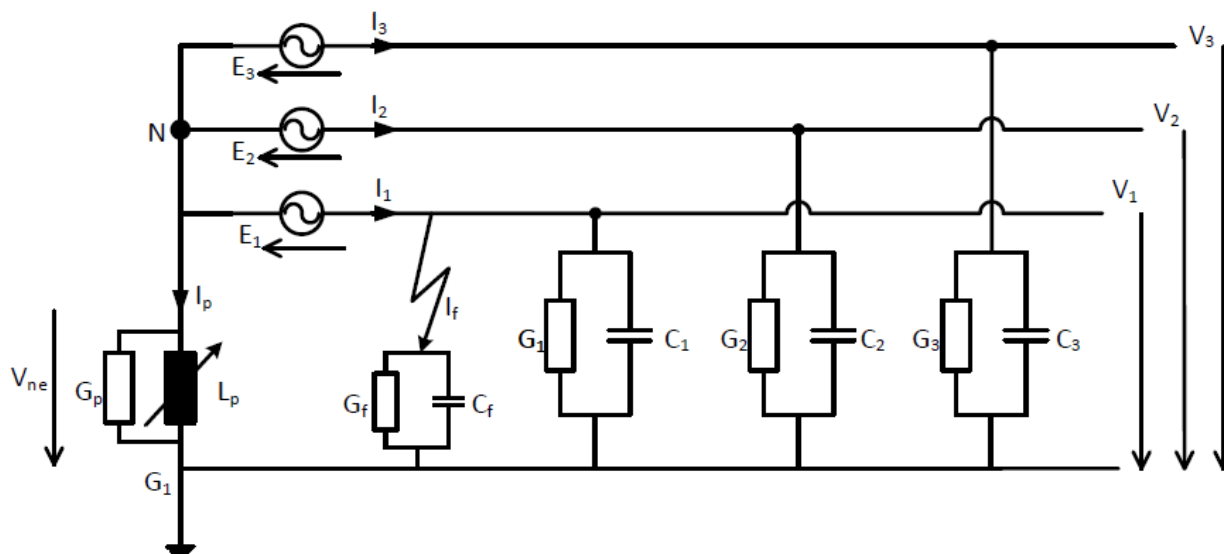
Αντίθετα το σύστημα γείωσης με χαμηλή αντίσταση, συνήθως, χρησιμοποιείται σε συστήματα υψηλής τάσης, επειδή έχει τη δυνατότητα να χειρίζεται υψηλότερα ρεύματα γείωσης-σφάλματος στην περιοχή μεταξύ 100-1000 A. Η επίδραση του ρεύματος χωρητικού φορτίου μπορεί να είναι αμελητέα επειδή επηρεάζει μικρό ποσοστό του ρεύματος σφάλματος-γείωσης. Ως εκ τούτου η ωμική τιμή της χαμηλής αντίστασης στη γείωση μπορεί να προσδιοριστεί από τη σχέση: $R_N = V_{NE}/I_f$, όπου V_{NE} είναι η τάση γραμμής του δικτύου στη γείωση και I_f είναι το ρεύμα σφάλματος-γείωσης [69].

Το σύστημα γείωσης χαμηλής αντίστασης έχει το πλεονέκτημα ότι επιτρέποντας υψηλά ρεύματα σφάλματος-γείωσης διευκολύνει την ανίχνευση σφαλμάτων και ενεργοποιεί το προστατευτικό σύστημα όπως τα ρελέ ασφαλείας τα οποία αποσυνδέουν το προκύπτον σφάλμα από την υπόλοιπη λειτουργία της γείωσης. Οι παροδικές υπερτάσεις μπορεί να είναι περιορισμένες σε σύγκριση με αυτές που εμφανίζονται τόσο στο απομονωμένο όσο και στο σύστημα γείωσης συντονισμού που περιγράφεται παρακάτω [70,74,75].

Ωστόσο, σημαντικό μειονέκτημα του συστήματος χαμηλής αντίστασης είναι ότι η υψηλή τιμή του ρεύματος σφάλματος-γείωσης, υπάρχει η πιθανότητα να αποβεί επικίνδυνη τόσο για τον εξοπλισμό όσο και για τους εργαζομένους [70,76].

Σύστημα Γείωσης Συντονισμού (Resonance Earthed System)

Στα ηλεκτρικά δίκτυα που χαρακτηρίζονται από υψηλή τάση και μεγάλο μήκος καλωδίων τα ρεύματα σφάλματος που προέρχονται από χωρητικά φορτία, τείνουν να λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές προκαλώντας ιδιαίτερη ανησυχία. Χρησιμοποιώντας το σύστημα γείωσης συντονισμού τα ρεύματα σφάλματος μπορούν να μειωθούν [77]. Είναι δυνατόν να χρησιμοποιείται ένας αντιστάτης προκειμένου αν αυξηθεί η ευαισθησία στην ανίχνευση σφαλμάτων [75].



Σχήμα 4.10 Ισοδύναμο κύκλωμα για ένα σύστημα γείωσης συντονισμού

Για να περιοριστεί το άεργο μέρος του ρεύματος σφάλματος γραμμής-γείωσης, το σύστημα ισχύος πρέπει να φροντίσει να αντισταθμίζεται η λειτουργία του με επαγωγική αντίδραση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί συνδέοντας μία σπείρα τύπου Petersen μεταξύ του ουδέτερου σημείου του μετασχηματιστή και της γείωσης. Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζεται ένα απλό ισοδύναμο κύκλωμα που χρησιμοποιείται συχνά. Οι πηγές τριφασικής τάσης θεωρούνται ιδανικά συμμετρικές και οι αντιστάσεις των γραμμών και οι επαγωγές αμελητέες [78,79].

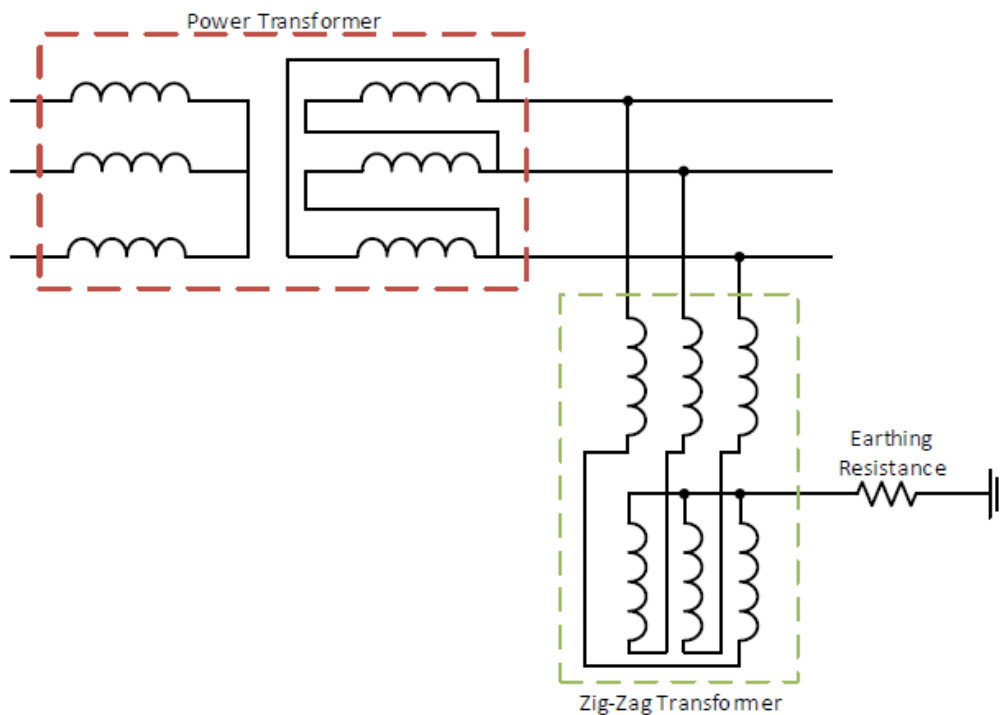
Η σπείρα (πηνίο) Petersen μπορεί να ρυθμιστεί σε μόνο μία συχνότητα, τη λεγόμενη ονομαστική συχνότητα. Αυτό οδηγεί σε αύξηση του μεγέθους του υπολειπόμενου ρεύματος όταν παρουσιάζεται κάποιο σφάλμα. Η χωρητικότητα του συστήματος αλλάζει διαρκώς, εξαιτίας για παράδειγμα των εναλλαγών γραμμών, γεγονός που καθιστά πιο δύσκολη τη ρύθμιση του πηνίου. Για αυτό το λόγο το πηνίο Petersen πρέπει να συντονίζεται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας προκειμένου να επιτευχθεί συντονισμός [79,80].

Δύο είναι τα σημαντικά πλεονεκτήματα του συστήματος γείωσης με συντονισμό. Πρώτον, μειώνοντας το χωρητικό ρεύμα, μειώνεται το ενεργό ρεύμα σφάλματος-γείωσης και δεύτερον, με ένα μικρό ρεύμα σφάλματος τα τόξα υπέρτασης δεν μπορούν να συντηρηθούν και συνεπώς εξαφανίζονται [69,81].

Το σημαντικότερο μειονέκτημα του συστήματος συντονισμού είναι ότι κανονικά το πηνίο Petersen δεν μπορεί να επιτύχει τέλειο συντονισμό. Εάν συνέβαινε τέλειος συντονισμός, θα υπήρχε υψηλή τιμή τάσης μεταξύ του εδάφους και του ουδέτερου σημείου της γείωσης [81]. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι η εμφάνιση των παροδικών υπερτάσεων είναι λιγότερο περιορισμένη στην περίπτωση των συστημάτων χαμηλής αντίστασης [75].

Σύστημα Γείωσης με Μετασχηματιστή (Earthing Transformer)

Σε ορισμένα συστήματα ισχύος, παρά το γεγονός ότι απαιτείται, δεν υπάρχει ουδέτερο σημείο. Για αυτό το λόγο, συνήθως, χρησιμοποιείται ένας μετασχηματιστής zig-zag, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα τεχνητό ουδέτερο σημείο. Η σύνθετη αντίσταση ενός τέτοιου μετασχηματιστή είναι χαμηλή και για αυτό το λόγο το ρεύμα σφάλματος είναι ιδιαίτερα υψηλό. Επομένως, το όριο του ρεύματος σφάλματος αποφασίζεται ανάλογα με την αντίσταση που εισάγεται στο σύστημα γείωσης. Η αντίσταση μπορεί να εισαχθεί είτε μεταξύ του μετασχηματιστή, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.11 είτε απευθείας στις περιελίξεις [82,83].



Σχήμα 4.11 Ισοδύναμο κύκλωμα για ένα Zig-Zag σύστημα γείωσης με μετασχηματιστή

4.2.4.2 Λοιποί παράμετροι ενός συστήματος γείωσης

Ηλεκτρόδιο γείωσης

Όταν κατασκευάζονται συστήματα γείωσης για βιομηχανικά/εμπορικά συστήματα ισχύος πρέπει να ληφθούν κάποια πράγματα υπόψη. Η ασφαλής εγκατάσταση απαιτεί σχεδιασμό για παράδειγμα όσον αφορά την αντίσταση της γείωσης, αποφασίζοντας τι είδους μέθοδο κατασκευής θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί και με τι τρόπο θα εγκατασταθεί το ηλεκτρόδιο γείωσης [84].

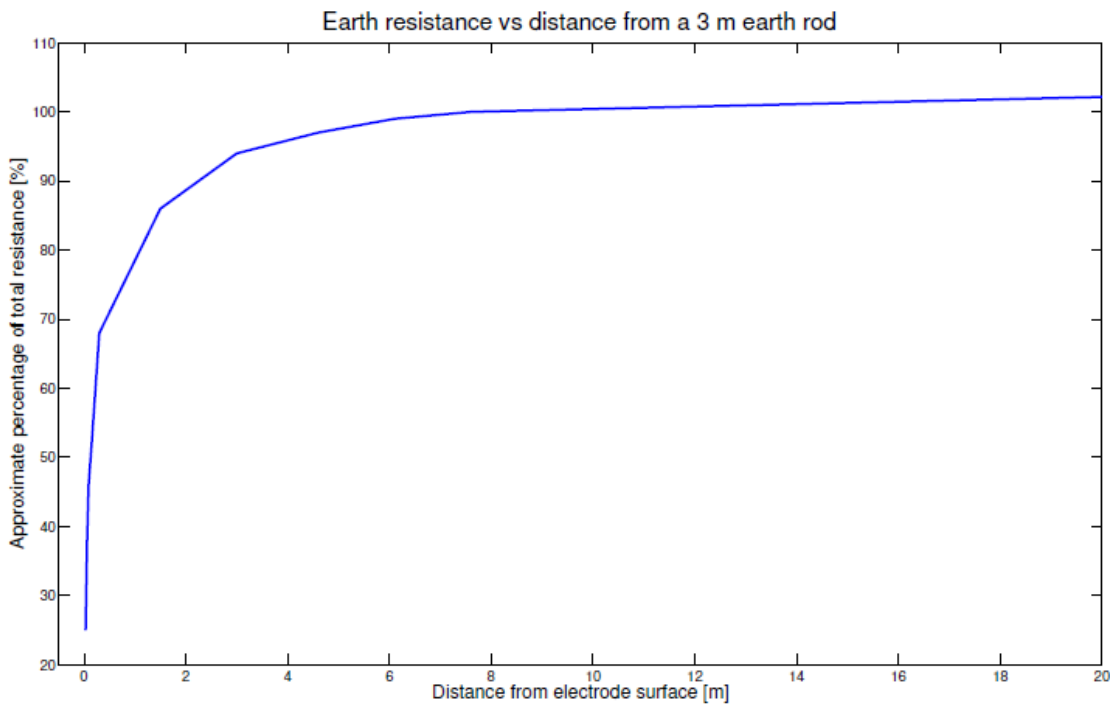
Κατά τον προσδιορισμό της αντίστασης γείωσης ενός ηλεκτροδίου γείωσης πρέπει να ληφθούν τρία πράγματα υπόψη:

A. Η αντίσταση του ηλεκτροδίου

B. Η αντίσταση επαφής μεταξύ του ηλεκτροδίου και του εδάφους

Γ. Η αντίσταση του εδάφους

Η αντίσταση του εδάφους παρατηρείται προς τα έξω από την επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Τα A και B είναι αμελητέα σε σύγκριση με το Γ, επομένως μπορούν να παραβλεφθούν. Η αντίσταση του εδάφους γύρω από το ηλεκτρόδιο μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα μιας σειράς αντιστάσεων κάποιων εικονικών κελύφων γύρω από το ηλεκτρόδιο. Αυτά τα εικονικά κελύφη (virtual shells) βρίσκονται έξω από το ηλεκτρόδιο με την αντίσταση να μειώνεται με ταυτόχρονη αύξηση της επιφάνειας του εκάστοτε κελύφους. Δηλαδή το εικονικό κέλυφος που βρίσκεται πιο κοντά στη ράβδο διαθέτει τη μεγαλύτερη τιμή αντίστασης. Στο σχήμα 4.12 παρουσιάζεται ο τρόπος άυξης της αντίστασης [84].



Σχήμα 4.12 *Αύξηση της αντίστασης γείωσης συναρτήσει της απόστασης του ηλεκτροδίου*

Η σύνδεση μεταξύ του εκάστοτε συστήματος με το έδαφος είναι διαφορετική, πράγμα που αποτελεί τη μεγαλύτερη δυσκολία στο σχεδιασμό ενός συστήματος γείωσης [84]. Είναι απαραίτητο να διερευνηθεί η ειδική αντίσταση του εδάφους στο σημείο που γίνεται η σύνδεση, η οποία μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το βάθος, τη θερμοκρασία, την υγρασία κ.α.. Για την ασφάλεια τόσο του προσωπικού όσο και του εξοπλισμού, η συγκεκριμένη αντίσταση πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Συνιστάται η αντίσταση να έχει τιμή 1-5 Ω όσον αφορά υποσταθμούς βιομηχανικών εγκαταστάσεων ή μεγάλες εμπορικές εγκαταστάσεις [84]. Υπάρχουν δύο διαφορετικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν την ειδική αντίσταση του εδάφους. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από το σκοπό της εφαρμογής του συστήματος γείωσης και της ακρίβειας που απαιτείται. Οι μέθοδοι αυτές είναι:

A. Η μέθοδος χαμηλού ρεύματος (low-current method). Ένα επιπλέον ηλεκτρόδιο είναι θαμμένο περίπου 50 m κάτω από το ηλεκτρόδιο γείωσης. Κάπου μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων είναι θαμμένος ένας ανιχνευτής ρεύματος. Παρέχεται μία ποσότητα ρεύματος μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων και στη συνέχεια μετράται η τάση που δημιουργείται μεταξύ του ηλεκτροδίου

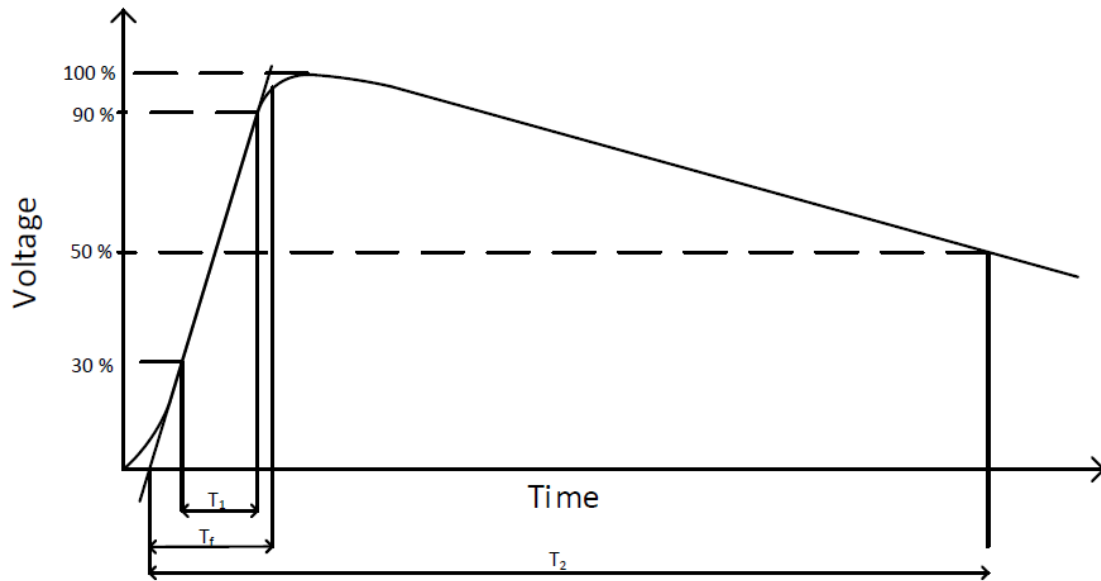
γείωσης και του ανιχνευτή, και αμέσως μετά με χρήση του νόμου του Ohm υπολογίζεται η αντίσταση του ηλεκτροδίου γείωσης [84].

B. Η μέθοδος υψηλού ρεύματος (high-current method). Σε αυτή τη μέθοδο το επιπλέον ηλεκτρόδιο τοποθετείται πολύ πιο μακριά από το ηλεκτρόδιο γείωσης σε σχέση με την προηγούμενη μέθοδο, σε απόσταση περίπου 10 km από το ηλεκτρόδιο γείωσης. Σε αυτή την περίπτωση το επιπλέον ηλεκτρόδιο είναι, συνήθως, ένα ακόμα ηλεκτρόδιο γείωσης το οποίο χρησιμοποιείται σε κάποιον άλλο υποσταθμό και η γραμμή μέτρησης που χρησιμοποιείται είναι κάποια εναέρια γραμμή που έχει τεθεί εκτός λειτουργίας. Ένας μετασχηματιστής χρησιμοποιείται ως πηγή ρεύματος, αλλά για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια προτιμάται, συνήθως, η χρήση μίας ξεχωριστής πηγής ρεύματος, όπως για παράδειγμα μία φορητή γεννήτρια πετρελαίου [84].

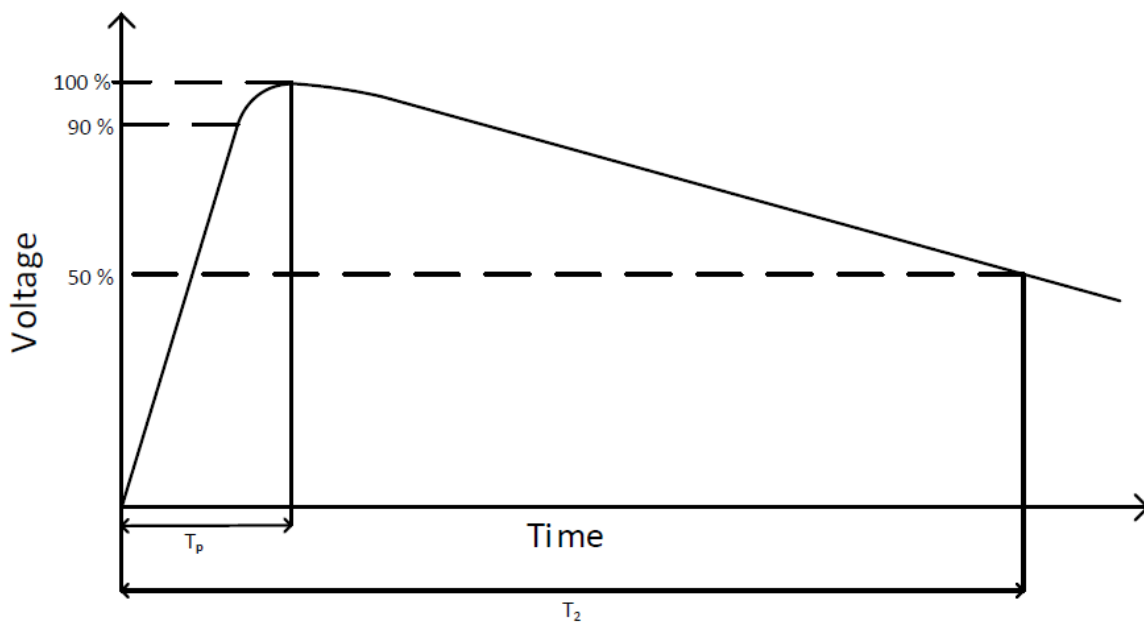
Τα ηλεκτρόδια γείωσης είναι συνήθως ηλεκτρόδια που έχουν συγκολληθεί με σκυρόδεμα. Τα ηλεκτρόδια είναι, συνήθως, μία ράβδος που οδηγείται μέσα στο έδαφος. Μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα εμφανίζει η χρήση λίγων ράβδων που είναι βαθιά χωμένες στο έδαφος, παρά πολλές μικρές σε μήκος ράβδοι. Για τις συνήθεις συνθήκες εδάφους, η χρήση μίας ράβδου μήκους 3 m καλύπτει το ελάχιστο στάνταρ. Τέλος, τα ενσωματωμένα σε σκυρόδεμα ηλεκτρόδια είναι ημιαγώγιμα και εμφανίζουν μικρότερη αντίσταση από το μέσο αργιλικό έδαφος [84].

Παλμική υπέρταση

Οι σχηματιζόμενες παλμικές τάσεις προκαλούν συχνά διαταραχές στα συστήματα ισχύος. Αυτές οι παροδικές υπερτάσεις εμφανίζουν μέγιστα πολύ μεγαλύτερα από τα μέγιστα στην τιμή των τάσεων που δημιουργούνται σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Υπάρχουν δύο είδη παλμικών υπερτάσεων, οι υπερτάσεις κεραυνού (4.13) και οι υπερτάσεις εναλλαγής (Σχήμα 4.14) [85].



Σχήμα 4.13 Γενική μορφή κεραμικού παλμού υπέρτασης



Σχήμα 4.14 Γενική μορφή παλμικής υπέρτασης εναλλαγής

Οι κεραμικές υπερτάσεις προκαλούνται από κεραμικά πλήγματα εναέριων γραμμών η διάυλων υπαίθριων υποσταθμών. Το εύρος της σχηματιζόμενης τάσης είναι πολύ υψηλό, κάποιες φορές

ξεπερνά τα 1000 kV, γεγονός που προκαλεί την εισαγωγή υψηλής πυκνότητας ρεύματος στο σύστημα γείωσης. Η τιμή των ρευμάτων είναι της τάξης των 100 kA και μερικές φορές ακόμα μεγαλύτερα. Το κεραυνικό φωστικό κύμα που προκαλείται από το κεραυνικό πλήγμα είναι πολύ απότομο και μπορεί να υποσκάψει τη μόνωση των μετασχηματιστών ισχύος ή του λοιπού εξοπλισμού. Ο πρώτος χρόνος του κεραυνικού κύματος (front time) T_f είναι $1.2 \mu s \pm 30 \%$ και ο μισός (half time) είναι $T_2 = 50 \mu s \pm 20 \%$. Οι κεραυνικοί παλμοί αναφέρονται ως 1.2/50 μs κυμάτων. Ο πρώτος χρόνος ορίζεται ως $T_2 \times 1.67$. Για την απόσβεση των υψηλών μεταβατικών τάσεων που δημιουργούνται από το πλήγμα, τα συστήματα ισχύος είναι εξοπλισμένα με ειδικούς απαγωγείς υπερτάσεων (surge arresters) για διαστρεβλώνουν τα κεραυνικά κύματα [85,86].

Οι παλμικές υπερτάσεις εναλλαγής δεν έχουν τόσο μεγάλο πλάτος όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.14 σε σύγκριση με τις κεραυνικές (Σχήμα 4.13). Οι μεταβατικές μεταβολές σχετίζονται με την τάση λειτουργίας και το σχήμα του παλμικού κύματος επηρεάζεται άμεσα από τη σύνθετη αντίσταση του συστήματος.

4.2.4.3 Συστήματα γείωσης για αιολικά πάρκα στον Ευρωπαϊκό χώρο

Στον Ευρωπαϊκό χώρο οι κανονισμοί και τα πρότυπα λειτουργίας των συστημάτων αντικεραυνικής προστασίας των αιολικών πάρκων διαφέρουν μεταξύ των χωρών. Αρκετές χώρες, ανάμεσα στις οποίες και η Ελλάδα, ακολουθούν τα πρότυπα και τους κανονισμούς που δημοσιεύονται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή Ηλεκτροτεχνικής Πιστοποίησης.

Για την παρούσα εργασία δεν είναι σημαντικό τι είδους γείωση χρησιμοποιεί η κάθε εταιρεία, αλλά τι είδους συστήματα γείωσης χρησιμοποιούνται σε αιολικά πάρκα σε κάθε χώρα. Διαθέσιμα στοιχεία δεν υπάρχουν στο διαδίκτυο, οπότε ήταν απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν στοιχεία από άλλες εργασίες στις οποίες υπήρξε επαφή απευθείας με τις εταιρείες που έχουν αιολικά πάρκα, προκειμένου να συλλεχθούν οι πληροφορίες.

Χαρακτηριστική είναι η εργασία των Jansson και Wadstrom [87], ο οποίος επικοινωνήσαν με πολλές εταιρείες που διαθέτουν αιολικά πάρκα στον Ευρωπαϊκό χώρο και κατάφερε να συλλέξει πληροφορίες σχετικά με τα συστήματα γείωσης που χρησιμοποιούν. Στον Πίνακα 4.2 παρατίθενται οι χώρες και οι μονάδες παραγωγής αιολικής ενέργειας με τις οποίες προσπάθησαν να επικοινωνήσουν.

Πίνακας 4.2 Αριθμός αιολικών πάρκων ανά χώρα με τα οποία επιχειρήθηκε επαφή

Κράτος	Αριθμός αιολικών πάρκων
Αυστρία	4
Βέλγιο	6
Βουλγαρία	1
Γαλλία	2
Γερμανία	21
Δανία	5
Ελλάδα	2
Εσθονία	2
Ηνωμένο Βασίλειο	34
Ισπανία	15
Ιταλία	3
Κροατία	1
Κύπρος	1
Λιθουανία	1
Νορβηγία	4
Ολλανδία	4
Πολωνία	7
Πορτογαλία	8
Ρουμανία	1
Σουηδία	25
Τσεχία	3

Στον Πίνακα 4.3 παρατίθενται τα αποτελέσματα της έρευνας. Όπως είναι εμφανές, πολλές από τις εταιρείες δεν ανταποκρίθηκαν, και για αυτό το λόγο δεν υπάρχουν πληροφορίες για τα συστήματα γείωσης αιολικών πάρκων για όλες τις χώρες.

Πίνακας 4.3 Είδος συστήματος γείωσης για διάφορα αιολικά πάρκα στον Ευρωπαϊκό χώρο

Κράτος	Είδος συστήματος γείωσης	Αριθμός αιολικών πάρκων
Αυστρία	Low-resistance	3
Βέλγιο	Solid	2
Γερμανία	Low-resistance	3
	Solid	1
	Low-resistance	1
	Earthing transformer / Low resistance	1
Δανία	Isolated	1
	Low-resistance	8
	Low-resistance	2
Ηνωμένο Βασίλειο (Αγγλία)	Low-resistance	1
Ηνωμένο Βασίλειο (Β. Ιρλανδία)	Low-resistance	3
Ηνωμένο Βασίλειο (Ουαλία)	Low-resistance	1
Ηνωμένο Βασίλειο (Σκωτία)	Low-resistance	1
	Earthing transformer	1
Ιταλία	Isolated	1
Νορβηγία	Low-resistance	1
Ολλανδία	Earthing transformer / Solidly earthed	1
Πορτογαλία	Low-resistance	1
	Resonance	20
	Earthing transformer / Resonance	1
	Low-resistance	2
Σουηδία	Earthing transformer / Low resistance	1
	Isolated	1

Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι η πλειοψηφία των αιολικών πάρκων που έδωσαν στοιχεία αναφορικά με το σύστημα γείωσης που χρησιμοποιούν, κάνουν χρήση του συστήματος χαμηλής αντίστασης (low-resistance). Επίσης, εμφανίζονται διαφορές από χώρα σε χώρα. Στη Σουηδία τα περισσότερα αιολικά πάρκα χρησιμοποιούν Σύστημα Συντονισμού (resonance) ενώ υπάρχει και η πιθανότητα χρήσης συνδυαστικού συστήματος γείωσης, όπως αυτό του μετασχηματιστή / χαμηλής αντίστασης (earthing transformer / low-resistance) ή του μετασχηματιστή / συντονισμού (earthing transformer / resonance) που χρησιμοποιούνται σε κάποιες αιολικές φάρμες στη Σουηδία και στη Δανία.

4.2.4.4 Συστήματα γείωσης για αιολικά πάρκα στην Ελλάδα

Η Ελλάδα διαθέτει αυτή τη στιγμή μόνο χερσαία αιολικά πάρκα, αλλά υπάρχει σχεδιασμός να κατασκευαστούν και υπεράκτια αιολικά πάρκα όπως αυτό στην θαλάσσια περιοχή του Αγίου Ευστρατίου κοντά στη Λήμνο. Το αιολικό πάρκο που βρίσκεται στο νησάκι του Αγίου Γεωργίου στο Αιγαίο πέλαγος διαθέτει ισχύ ίση με 73.2 MW και είναι το μεγαλύτερο του Ελλαδικού χώρου. Αρκετά μεγάλο είναι και το αιολικό πάρκο του Αραχναίου στην Αργολίδα ισχύος 38 MW και το Πάρκο Άνεμος Μακεδονία στη Φλώρινα με συνολική ισχύ 28.9 MW.

Τα ελληνικά αιολικά πάρκα κατασκευάζονται συνήθως σε κορυφογραμμές με βραχώδες ή ημιβραχώδες έδαφος, με συνέπεια η ειδική αντίσταση του εδάφους να είναι πολύ μεγάλη, ενώ η διαθέσιμη περιοχή για το σύστημα γείωσης είναι συνήθως περιορισμένη. Έτσι, στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι εφικτή η κατασκευή συστήματος γείωσης σε κάθε ανεμογεννήτρια, το οποίο να παρουσιάζει χαμηλή τιμή αντίστασης γείωσης. Γι' αυτό είναι απαραίτητη η μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους στην περιοχή που θα τοποθετηθεί το σύστημα γείωσης, ώστε να είναι δυνατός ο ακριβέστερος υπολογισμός των βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής, οι οποίες θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη σχεδίαση του συστήματος γείωσης [88, 89].

Η τιμή της αντίστασης γείωσης εξαρτάται από την ειδική αντίσταση του εδάφους. Η ειδική αντίσταση του εδάφους μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες. Γι' αυτό πρέπει να τονισθεί ότι είναι απαραίτητη η μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, που εμφανίζει την μέγιστη τιμή. Επιπλέον, πρέπει

το κάθε σύστημα γείωσης να μπορεί να ανεξαρτητοποιηθεί, έτσι ώστε η αντίσταση γείωσης κάθε ανεξάρτητου συστήματος γείωσης να μετρείται κατά το στάδιο της κατασκευής. Στο στάδιο της κατασκευής, τα ανεξάρτητα συστήματα γείωσης των ανεμογεννητριών χωρίζονται μεταξύ τους με φρεάτια, ώστε να είναι δυνατός ο έλεγχος/μέτρηση του κάθε συστήματος γείωσης ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα. Μ' αυτόν τον τρόπο, μπορεί, αφενός να αποδειχθεί η ακρίβεια των υπολογισμών της μελέτης, και αφετέρου να είναι δυνατή η, ενδεχομένως απαιτούμενη, ενίσχυση του συστήματος γείωσης.

Αναλυτικά τα βήματα που ακολουθούνται για την κατασκευή του συστήματος γείωσης ενός αιολικού πάρκου περιγράφονται παρακάτω:

1. Καθορισμός της μέγιστης τιμής ρεύματος σφάλματος του αιολικού πάρκου.
2. Επιλογή των υποψήφιων θέσεων εγκατάστασης των ανεμογεννητριών και των κέντρων ελέγχου.
3. Μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους με τη μέθοδο Wenner για κάθε υποψήφια θέση εγκατάστασης ανεμογεννήτριας ή κέντρου ελέγχου.
4. Εντοπισμός άλλων θέσεων στο αιολικό πάρκο που θα μπορούσαν να μειώσουν της αντίσταση γείωσης (πηγάδια, χώμα, κ.λπ.).
5. Υπολογισμός του μοντέλου εδάφους, βάσει μετρήσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους για όλες τις θέσεις στις οποίες έχουμε μετρήσεις.
6. Σχεδιασμός τυπικού πλέγματος γείωσης, για κάθε ανεμογεννήτρια ή υποσταθμό.
7. Υπολογισμός της αντίστασης γείωσης για κάθε σύστημα γείωσης.
8. Υπολογισμός του εγχυόμενου ρεύματος σφάλματος σε κάθε σύστημα γείωσης.
9. Υπολογισμός της μέγιστης επιτρεπόμενης ασφαλούς βηματικής τάσης και της μέγιστης επιτρεπόμενης ασφαλούς τάσεως επαφής για κάθε σύστημα γείωσης.
10. Υπολογισμός της βηματικής τάσης και της τάσης επαφής για κάθε σημείο στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από το πλέγμα γείωσης.
11. Έλεγχος των τιμών των παραπάνω μεγεθών. Είναι επιθυμητό:

- η συνολική αντίσταση γείωσης του πάρκου να είναι μικρότερη από 1Ω,
- η αντίσταση γείωσης της κάθε ανεμογεννήτριας να είναι μικρότερη από 10 Ω,
- οι βηματικές τάσεις και οι τάσεις επαφής να μην ξεπερνούν τα ασφαλή όρια, όπως αυτά ορίζονται από το Πρότυπο [90].

12. Εάν ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του βήματος 11, τότε η σχεδίαση έχει ολοκληρωθεί (οπότε ακολουθεί το βήμα 15), αλλιώς το επόμενο βήμα 13.

13. Βελτίωση συστήματος γείωσης με:

- αύξηση της επιφάνειας του συστήματος γείωσης,
- πύκνωση του πλέγματος γείωσης,
- προσθήκη κατακόρυφων ηλεκτροδίων,
- προσθήκη χώματος με χαμηλή ειδική αντίσταση ή βελτιωτικών εδάφους,
- διασύνδεση του συστήματος γείωσης με άλλο σύστημα γείωσης,
- αλλαγή προς το αυστηρότερο του κριτηρίου για τον χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος. Εφ' όσον εξασφαλίζεται από τα μέσα προστασίας ότι ο χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος είναι μικρότερος, τότε τα όρια ασφαλείας για τη βηματική τάση και την τάση επαφής έχουν μεγαλύτερες τιμές,
- χρήση κατάλληλου υλικού επιφανείας, συνήθως χαλκιού, στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από το σύστημα γείωσης, εάν αυτό επιφέρει αλλαγή στα όρια ασφαλείας.

14. Επανάληψη της παραπάνω διαδικασίας από το βήμα 4.

15. Κατασκευή του συστήματος γείωσης.

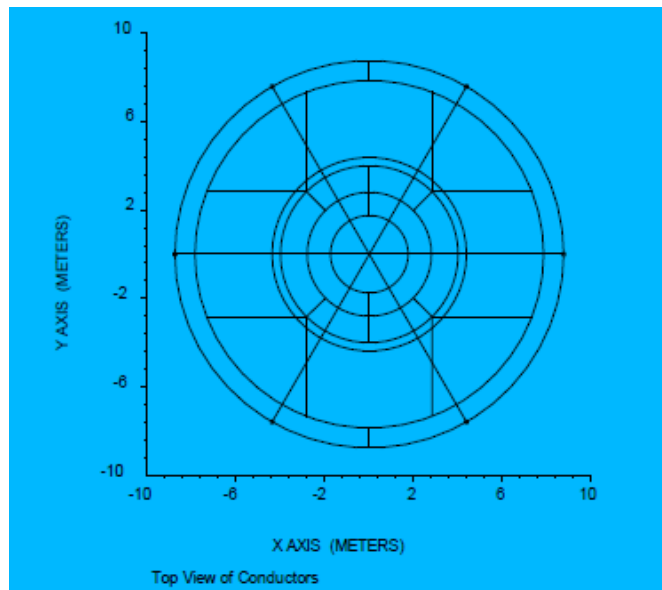
16. Μέτρηση της αντίστασης γείωσης.

17. Πραγματοποίηση τυχόν επιπλέον βελτιώσεων, όπου τούτο είναι τεχνικά αναγκαίο και εφικτό.

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία έχει εφαρμοσθεί στη σχεδίαση αρκετών αιολικών πάρκων της Ελλάδας με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Κάθε ανεμογεννήτρια και κέντρο ελέγχου θεωρείται ως μεμονωμένο σύστημα λόγω της μεγάλης απόστασης από τα γειτονικά του: η απόσταση μεταξύ διαδοχικών ανεμογεννητριών είναι περίπου 100m. Επομένως, η απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών είναι μεγαλύτερη από το ενεργό μήκος του συστήματος γείωσης για την

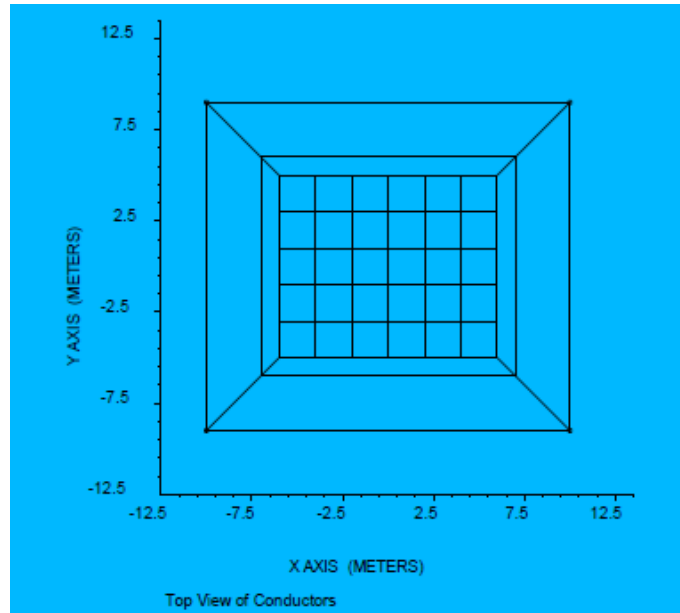
πλειοψηφία των υποψήφιων θέσεων εγκατάστασης ανεμογεννητριών. Η διασύνδεσή τους προσομοιώθηκε θεωρώντας αγωγούς τοποθετημένους στο σημείο διασύνδεσης, μήκους ίσου με το ήμισυ της απόστασης μεταξύ του συγκεκριμένου συστήματος και του επομένου [91, 92].

Χαρακτηριστική είναι η δουλειά των Κονταργύρη, Γόνου και Σταθόπουλου [93], σύμφωνα με την οποία πραγματοποιήθηκε έρευνα σε περισσότερες από 450 ανεμογεννήτριες στις αρχές της προηγούμενης δεκαετίας όσον αφορά την αντίσταση του εδάφους και μελετήθηκε το σύστημα γείωσης ενός αιολικού πάρκου σε τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις. Οι περιπτώσεις αυτές σχετίζονταν με διαφορές ως προς τον τρόπο κατασκευής πλεγμάτων γείωσης για τις ανεμογεννήτριες και τα κέντρα του αιολικού πάρκου.

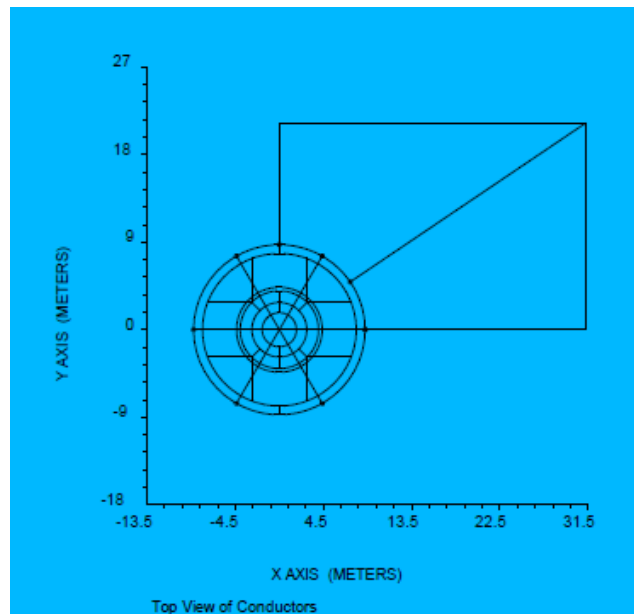


Σχήμα 4.15 Σύστημα γείωσης ανεμογεννήτριας

Διαφορετικά συστήματα γείωσης σχεδιάστηκαν για κάθε τουρμπίνα ξεχωριστά και στη συνέχεια όλα αυτά τα ανεξάρτητα συστήματα ενώθηκαν με χρήση συνδέτη από χαλκό θαμμένο μέσα στο έδαφος. Χαρακτηριστικά παρατίθενται στα Σχήματα 4.15 – 4.17 συστήματα γείωσης για κάποιες από τις προαναφερθείσες περιπτώσεις.

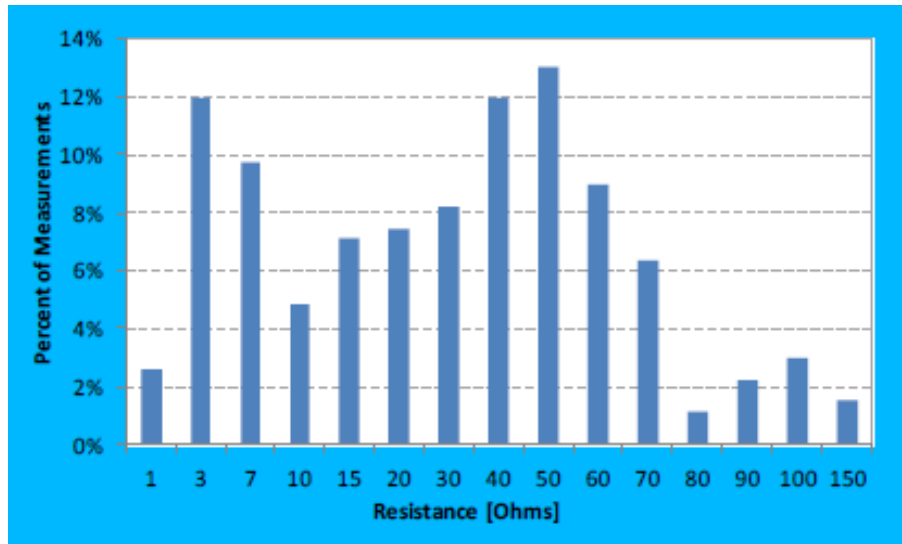


Σχήμα 4.16 Σύστημα γείωσης κέντρου ελέγχου



Σχήμα 4.17 Ενισχυμένο σύστημα γείωσης ανεμογεννήτριας

Στο Σχήμα 4.18 εμφανίζεται η αντίσταση του εδάφους στα ελληνικά αιολικά πάρκα που μελετήθηκαν συναρτήσει του ποσοστού των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν από τη συγκεκριμένη ερευνητική ομάδα.



Σχήμα 4.18 Αντίσταση εδάφους ελληνικών αιολικών πάρκων

Η μέτρηση της συνολικής αντίστασης γείωσης ενός αιολικού πάρκου, που αποτελεί ένα εκτεταμένο σύστημα γείωσης, είναι μία χρονοβόρα διαδικασία, με αρκετά μεγάλο οικονομικό κόστος. Πολλές φορές, μάλιστα, είναι πάρα πολύ δύσκολη, ή ακόμα και αδύνατη, η πραγματοποίηση των μετρήσεων, λόγω τοπογραφικών και χωροταξικών περιορισμών που υφίστανται στην περιοχή του έργου. Η έλλειψη των κατάλληλων, σύμφωνα με το Πρότυπο, αποστάσεων για την πραγματοποίηση της μέτρησης της αντίστασης προσγείωσης σε ένα εκτεταμένο σύστημα γείωσης έχει δυσμενείς επιπτώσεις στην ακρίβεια της μέτρησης με αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγάλου σφάλματος μέτρησης. Για τους παραπάνω λόγους προτείνεται η κατασκευή του συστήματος γείωσης με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση της αντίστασης προσγείωσης του κάθε ανεξάρτητου συστήματος γείωσης (ανεμογεννήτριας, κέντρου ελέγχου, υποσταθμού, κ.λπ.) που υπάρχει στο αιολικό πάρκο.

Βιβλιογραφία

- [1] Μπάμπος Γ., «Επιλογή και Σχεδιασμός Κατάλληλων Καταλυτικών Συστημάτων των Ηλεκτροδίων Κελιών PEM – Παρασκευή και Ανάλυση της Δομής των Καταλυτικών Συστημάτων των Ηλεκτροδίων», Πανεπιστήμιο Πατρών, 2015.
- [2] Καραλής Ε., Διπλωματική εργασία: «Λειτουργία και έλεγχος συστήματος ανεμογεννήτριας με Μηχανή Επαγωγής σε Διάταξη Διπλής Τροφοδότησης» Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών, Ιούνιος 2008.
- [3] Σιανάς Δ., Διπλωματική εργασία: «Αντικεραυνική Προστασία Ανεμογεννητριών» Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Ηλεκτρονικών Υπολογιστών.
- [4] W. Musial and B. Ram, "Large-Scale Offshore Wind Power in the United States," U.S. National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-500-40745, September 2010.
- [5] E. Dupont, R. Koppelaar, H. Jeanmart, "Global available wind energy with physical and energy return on investments constraints", Applied Energy, 209 (2018) 322-338.
- [6] V. Fthenakis, H. C. Kim, "Land use and electricity generation: A life-cycle analysis". Renewable and Sustainable Energy Reviews. 13 (2009): 1465
- [7] A. Evans, V. Strezov, T. Evans, "Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies". Renewable and Sustainable Energy Reviews. 13 (2009): 1082–1088
- [8] S. Hewitt, L. Margetts & A. Revell, "Building a digital wind farm". Archives of Computational Methods in Engineering, 2017.
- [9] R. Gasch, J. Twele (ed.), Wind power plants. Fundamentals, design, construction and operation, Springer 2012
- [10] R. Gupta, A. Biswas, K.K. Sharma "Comparative study of a three-bucket Savonius rotor with a combined three-bucket Savonius–three-bladed Darrieus rotor", Renewable Energy 9 (2008) 1974-1981.

- [11] Jna. Gavaldà, J. Massons, F. Diaz, “Experimental study on a self-adapting Darrieus—Savonius wind machine”, *Solar & Wind Technology* 4 (1990) 457-461.
- [12] Margrét Ósk Óskarsdóttir, “A General Description and Comparison of Horizontal Axis Wind Turbines and Vertical Axis Wind Turbines”, Master Thesis, Faculty of Industrial Engineering, Mechanical Engineering and Computer Science, School of Engineering and Natural Sciences, University of Iceland, Reykjavik, October 2014.
- [13] Watts, Jonathan & Huang, Cecily. “Winds Of Change Blow Through China As Spending On Renewable Energy Soars”, *The Guardian*, 4 January 2012.
- [14] Γώγου Δ., «Επενδυτική Πολιτική Αιολικών Πάρκων στην Ελλάδα», Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2007.
- [15] De Prez V., “Wind energy in the EU: balancing wind farms siting and nature conservation”, Ghent University, 2017
- [16] Vestergaard J., “A Brief History of the Wind Turbine Industries in Denmark and the United States”, 2004.
- [17] Global Wind Report, Annual market update, GWEC (Global Wind Energy Council), 2017
- [18] 2016 State of Wind Development in the United States by Region, NREL (National Renewable Energy Laboratory), 2016
- [19] Reuters staff, “China starts building first 10-GW mega wind farm”, 2009.
- [20] Rajsekhar B., Van Hulle F., “Scope and prospects of re-engineering and retrofitting windfarms in India”. Proceedings of the European Wind Energy Conference, Copenhagen 2-9 July 2001. Energy Research Centre of the Netherlands.
- [21] Halevi G., Moed H., “Identifying emerging research topics in Wind Energy research using author given keywords”, *Research Trends*, 2012.
- [22] Franz P., “Romanian village hosts Europe's largest wind farm”, *Digital Journal* 2010.
- [23] “Whitelee Wind Farm joins major tourist attractions body”, *BBC News* 2012.

- [24] “London Array (Phase 1) Offshore Transmission Assets”, Preliminary Information Memorandum, RBC Capital Markets 2010.
- [25] “Gemini Offshore wind Project”, GEM-TM-PRM-053-English Summary EIA Gemini windfarms-V01.0, English Summary EIA Gemini windfarms, 2013.
- [26] Danko P., “Offshore Wind Link Deals for ABB, Siemens”, Earthtechling, 2015.
- [27] “Study on Technical Assistance in Realisation of the 2016 Report on Renewable Energy, in preparation of the Renewable Energy Package for the Period 2020-2030 in the European Union”, European Commission, Freiburg 2017.
- [28] Dr. Kelemenis Y., “Rising to the challenge: the growth of wind power generation in Greece”
- [29] Kabouris J., Hatzigargyriou N.D., “Wind power in Greece - Current situation, future developments and prospects”, Power Engineering Society General Meeting, IEEE 2006.
- [30] S.Dunlop, (2003). The Weather Identification Handbook. The Lyons Press. pp. 77–78. ISBN 1585748579.
- [31] World Meteorological Organization, ed. (1975). Cumulonimbus, International Cloud Atlas. I. pp. 48–50. ISBN 92-63-10407-7. Retrieved 28 November 2014.
- [33] Πυργιώτη Ε.,: «Προστασία Κατασκευών από Κεραυνούς», Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Πάτρα 2010.
- [34] Μαρκαντωνάκη Γ.Χ., «Κυκλωματική προσέγγιση του ιονισμού του εδάφους», Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, 2010.
- [35] Χαλδούπης, Χ., «Εισαγωγή στην ατμοσφαιρική φυσική», Εκδόσεις Κάλλιπος, 2015.
- [36] Λώλος Μ.Κ., «Καταμέτρηση Κεραυνικής Πυκνότητας στην Ευρύτερη Περιοχή Πατρών», Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Τομέας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, 2013.

- [37] Αλεξάνδρου Χ.Α., «Κεραυνοπληξία πλοίου: Πειραματική διερεύνηση, μέσω δοκιμών σε μοντέλα υπό κλίμακα», Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, 2014.
- [38] Τελώνης Α., «Μελέτη Επιπτώσεων Πληγμάτων Κεραυνών σε Πλοία», Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Τομέας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, 2013.
- [39] Σαραμετίδη Α., «Συμπεριφορά Ανεμογεννητριών σε Πλήγματα Κεραυνών», Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Τομέας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, 2013.
- [40] Βασιλείου Κ., «Προστασία του Ανθρώπου από Πλήγματα Κεραυνών σε Συστήματα Αντικεραυνικής Προστασίας», Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Τομέας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, 2016.
- [41] Χατζηευαγόρου Σ., «Διερεύνηση σφαλμάτων από κεραυνούς σε διατάξεις χαμηλής τάσης», Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Τομέας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, 2013.
- [42] Ζήρα Γ., «Μελέτη σφαλμάτων από κεραυνούς σε δίκυα μέσης τάσης», Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Τομέας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας 2015.
- [43] Σκαρναβή Λ., «Επιπτώσεις και προστασία από πλήγμα κεραυνού», Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Τομέας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, 2017.
- [44] Αθανασίου Σ., «Καταγραφή συμβάντων από κεραυνούς στον Ελλαδικό χώρο για την περίοδο 2011-2014», Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Τομέας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, 2015.

- [45] Hermoso B., Yokoyama S.: “Review of Research Methods for Lightning Protection in Wind Turbine Blades and Activity of Cigre WG C4.409”, paper 1157 1-4 ICLP 2010 30th International Conference on Lightning Protection, Cagliari, Italy, Sept. 13-17, 2010.
- [46] Hongo Y., Yokoyama Σ.: “Observation Results of Characteristics of Winter Lightning and Experimental Results on Lightning Protection for Wind Turbines” CIGRE SC C4 Kushiro Colloquium (Japan), 2009.
- [47] Coton I., Jenkins N., Pandiaraj K.: “Lighting Protection for Wind Turbine Blades and Bearings, UMIST, Manchester UK, 2001.
- [48] Djalel D., Abdallah G., Hocine L., “Study of the lightning impact on the wind-turbine”, Energy Research Journal 5 (2014) 17-25.
- [49] Wilson N., Myers J., Cummins K. L., Hutchinson M., Nag A., “Lightning attachment to wind turbines in Central Kansas: Video observations, correlation with the NLDN and in-situ peak current measurements”, European Wind Energy Association, Vienna, 2013
- [50] Cummins K. L., Zhang D., Quick M. G., Garolera A. C., Myers J., “Overview of the Kansas Windfarm2013 Field Program”, International Lightning Detection Conference, March 2014, Tucson, Arizona, U.S.A.
- [51] Wang D., Takagi N., Watanabe T., Sakurano H., Hashimoto M., “Observed characteristics of upward leaders that are initiated from a windmill and its lightning protection tower”, Geophysical Research Letters, vol. 35, 2008, DOI: 10.1029/2007GL032136
- [52] Ishii M., Saito M., Natsuno D., Sugita A.. “Lighting current observed at wind turbines at winter in Japan”, International Conference on Lightning and Static Electricity, Seattle, U.S.A., 2013.
- [53] Garolera A.C., Madsen S.F., Nissim M., Myers J.D., Holboell J., “Lightning Damage to Wind Turbine Blades from Wind Farms in U.S.”, IEEE Transactions
- [54] Arboleda J.I.B., “Lightning Currents and Electromagnetic Fields Associated With Return Strokes to Elevated Strike Objects” 1st Edn. PhD. Thesis, EPFL.

- [55] Djalel D., Mourad M., Sihem G., “Contribution to the study of the aggression of lightning phenomenon on the wind turbine structures”, *Wind Engineering* 40 (2016) 100-111.
- [56] Sorensen T., Jensen F.V., Raben N., Lykkegaard J., Saxov J., “Lightning protection for offshore wind turbines”, in: *Proceedings of the 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, Amsterdam, Netherlands, June 18–21, 2001.
- [57] Lorentzou M.I., Hatziaargyriou N.D., Cotton I., “Key Issues in Lightning Protection of Wind Turbines”, 2004.
- [58] Yasuda Y., Hara T., Funabashi T., “Analysis of Lightning Surge Propagation in Wind Farm”, *Electrical Engineering in Japan* 162 (2008) 709-716.
- [59] McNiff B. “Wind turbine lightning protection project 1999–200”¹. NREL Subcontractor Report, SR-500-31115, 2002.
- [60] Yamamoto K. et al. “A study on ground potential rise in case of a lightning strike on wind power plant”. 25th Symposium on Use of Wind Energy, p 244–247, 2003.
- [61] IEC 61400-24, *Wind Turbines – Part 24: Lightning Protection*, 2010.
- [62] Marc V., “Lightning risk assessment to wind turbines: methodology and guidelines”, in: *Proc. Int. Conf. on Lightn. Prot. Estoril, Portugal, September, 2016*.
- [63] March V., *Lightning risk assessment for direct lightning strikes to wind turbines in a wind farm – recommendations for IEC 61400-24*, in: *Proc. Asia-Pacific Conf. Lightning Protection*, Nagoya, Japan, June, 2015.
- [64] March V., “Lightning exposure assessment on wind farms based on lightning location system (LLS) information”, in: *Proc. Int. Conf. on Lightn. And Static Elect. Toulouse, France, September, 2015*.
- [65] March V., “Key issues to define a method of lightning risk assessment for wind farms”, *Electric Power Systems Research* 2017.
- [66] IEC 62305-2, *Protection Against Lightning Part 2: Risk Management*, 2010.
- [67] «Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές», Ελληνική Δημοκρατία, Υ.Π.Ε.Χ.Ω.Δ.Ε., Π.Ε.Τ.Ε.Π 04-50-01-00, Μάιος 2006.

- [68] Fellensiek W., Bohm A., “Earth and lightning protection system for ENERCON WECs”, Germany 2007.
- [69] Zipse D.W., Strycula G., 142-2007 – IEEE, “Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems”, Institute of Electrical and Electronics Engineerings, Inc, 2007.
- [70] Ostman M., “The pros and cons of alternative grounding systems,” Wartsila Technical Journal, 2009.
- [71] Shipp D., Angelini F., “Characteristics of Different Power Systems Neutral Grounding Techniques: Facts & Fiction”, IEEE 1988 Industry Applications Society Technical Conference, 1988.
- [72] Zipse D.W., Beaker R., Nicholson K., Brown J., Mohla D., Dennis C., Robinson M., Venugopalan S.I., 141-1993 - IEEE “Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants”, Institute of Electrical and Electronics Engineerings, Inc, 1993.
- [73] Sottile J., Novak T., Tripathi A., “Best Practices for Implementing High-Resistance Grounding in Mine Power Systems”, Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE, 2007.
- [74] Paul, D., Venugopalan, S.I., “Low-resistance grounding method for medium voltage power systems”, Industry Applications Society Annual Meeting, 1991., Conference Record of the 1991 IEEE, 1991.
- [75] Roberts J., Dr. Altuve H.J., and Dr. Hou D., “Review Of Ground Fault Protection Methods for Grounded, Ungrounded, And Compensated Distribution Systems”, tech. rep., Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2001.
- [76] Li L., Duan L., Zhou J., Zhang J., Zhou W., Li B., “Analysis and Comparison of Resonance Grounding with Low Resistance Grounding”, Critical Infrastructure (CRIS), 2010 5th International Conference.
- [77] Winell L., Elkraftsystem 2. Liber AB, 2003.
- [78] Parmar J., “Types of neutral earthing in power distribution (part 2)”, 2012.

- [79] Dolnik B., Kurimsky J., “Contribution to earth fault current compensation in middle voltage distribution networks”, PRZEGL , AD ELEKTROTECHNICZNY,no. 2, pp. 220-224, 2011.
- [80] Rofaklski K.-H., Schlabbach J., “Power System Engineering - Planning, Design, and Operation of Power Systems and Equipment”. Wiley-VCH, 2008.
- [81] Conwell R.N., Evans R.D., “The Petersen Earth Coil”, American Institute of Electrical Engineers, Journal of the (Volume:41 , Issue: 2).
- [82] Jadhavar S., “Grounding transformer”, Accessed: 2014-03-21.
- [83] Brown B., “Section 6: System grounding”. Accessed: 2014-03-21.
- [84] Lindmark H., “Eldistributionsanlaggningar, Kompendieblad i avsnittet Elkraftteknisk Matteknik. Hogskolan i Trollhattan”, Uddelvall, Institutionen for Teknik, 1999.
- [85] Kuel E., Zaengl W.S., Kuel J., “High Voltage Engineering: Fundamentals”. Butterworth-Heinemann, 2000.
- [86] Svenska Elektriska Kommissionen, SEK, Hogspanningshandboken. Svenska Elektriska Kommissionen, SEK, 2005.
- [87] Jansson D., Wadstrom P., “Study of system earthing for 36 kV – collector grids for wind farms”, Chalmers University of Technology, 2014.
- [88] Kontargyri V.T., Gonos I.F., Stathopoulos I.A., “Frequency Response of Grounding Systems for Wind Turbine Generator”, Proceedings of the 14th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2005), Beijing, China, August 25-29, 2005, paper B-13.
- [89] Lorentzou M.I., Hatziargyriou N.D., Manos G.A., Sietis T., “Intergrated grounding system of wind-farms for lightning and fault protection”, MedPower 2004, Lemessos, Cyprus, 15-17 November 2004.
- [90] ANSI/IEEE Std 80-2000, “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, 2000.
- [91] Gouvalas N.K., Gonos I.F., Stathopoulos I.A., “Impact study of short-circuit calculation methods on the design of a wind farm’s grounding system”, Renewable Energy 66 (2014) 25-32.

[92] Grange F., Journet S., “Safety of Wind Farm Grounding Systems under Fault and Lightning Currents”, 33rd International Conference of Lightning Protection 2016.

[93] Kontargyri V.T., Gonos I.F., Stathopoulos I.A., “Study on wind farm grounding system”, 2004.