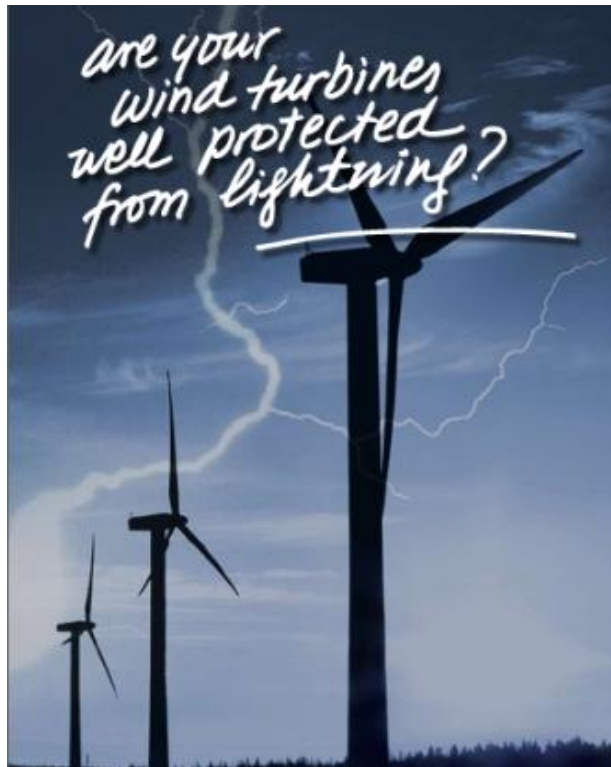


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ
ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Αριθμός 1048

ΘΕΜΑ: ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.



ΕΙΣΗΓΗΤΕΣ:
ΠΥΡΓΙΩΤΗ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:
ΞΟΥΡΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ
ΦΟΥΓΙΑΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ

ΠΑΤΡΑ 2011

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ
ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Αριθμός 1048

ΘΕΜΑ: ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.

ΕΙΣΗΓΗΤΕΣ:
ΠΥΡΓΙΩΤΗ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:
ΞΟΥΡΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ
ΦΟΥΓΙΑΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ

ΠΑΤΡΑ 2011

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	iv
<hr/>	
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2. ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	2
2.1 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	2
2.2. ΓΕΝΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ.....	5
2.3 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ.....	7
2.4.ΔΟΜΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	12
2.4.1 Νασέλλα.....	12
2.4.2 Πύργος.....	17
2.4.3 Βάση.....	21
2.5 ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΔΙΕΘΝΩΣ.....	21
ΑΝΑΦΟΡΕΣ 2 ^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	27
3. Ο ΚΕΡΑΥΝΟΣ ΚΑΙ ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΣΤΙΣ ΑΓ	28
3.1 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΕΡΑΥΝΩΝ.....	28
3.1.1 Διαχωρισμός των ηλεκτρικών φορτίων στα νέφη.....	29
3.1.2 Κατηγορίες κεραυνικών εκκενώσεων.....	30
3.1.3. Φάσεις κεραυνικών εκκενώσεων.....	33
3.1.4. Πολικότητα κεραυνικών εκκενώσεων.....	36
3.1.5. Παράγοντες που επηρεάζουν τον κεραυνό.....	37
3.1.6. Παράμετροι κεραυνού.....	37
3.1.7. Κεραυνική στάθμη – Ισοκεραυνικές καμπύλες.....	38
3.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΠΛΗΓΜΑΤΑ ΚΕΡΑΥΝΩΝ.....	39
3.2.1 Επιπτώσεις στον άνθρωπο.....	39
3.2.2 Επιπτώσεις σε κατασκευές.....	40
3.2.2.1 <i>Επιπτώσεις από την τιμή κορυφής του ρεύματος του κεραυνού (lighting peak current) καθώς και από την ειδική ενέργεια</i>	41
3.2.2.2 <i>Επιπτώσεις από την συνολική μεταφορά φορτίου</i>	43
3.2.2.3 <i>Επιπτώσεις από την κλίση του ρεύματος</i>	43
ΑΝΑΦΟΡΕΣ 3 ^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	44

4. ΚΕΡΑΥΝΙΚΟ ΠΛΗΓΜΑ ΣΕ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

4.1 ΠΤΕΡΥΓΙΑ	45
4.2 ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ	45
4.3 ΤΥΠΟΙ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥΣ	47
4.4 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	50
4.5 ΤΟ ΡΕΥΜΑ ΚΕΡΑΥΝΟΥ ΣΤΙΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΟΥ ΔΙΕΞΑΓΟΝΤΑΙ ΣΤΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	53
4.5.1 Παράμετροι και προδιαγραφές των δοκιμών	53
4.5.2 Επιλεγμένες δοκιμές του ρεύματος κεραυνού στα διάφορα μέρη της ανεμογεννήτριας	54
4.6 ΦΘΟΡΑ ΛΟΓΩ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΚΕΡΑΥΝΟΥ ΣΤΟ ΚΙΒΩΤΙΟ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ	67
4.7 ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΟ	67
4.8 ΒΛΑΒΕΣ ΣΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	67
4.8.1 Αγώγιμη ζεύξη	68
4.8.2 Σύζευξη ηλεκτρικού πεδίου	69
4.8.3 Σύζευξη μαγνητικού πεδίου	70
4.9 ΕΠΑΓΟΜΕΝΕΣ ΤΑΣΕΙΣ	71
4.9.1 Τάση επαφής	73
4.9.2 Βηματική τάση	75
4.9.3 Τάσεις βρόχων καλωδίων	76
4.9.4 Υπερτάσεις	78
4.10 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΒΛΑΒΩΝ	79
4.10.1 Βλάβες	79
4.10.2 Κόστος	83
ΑΝΑΦΟΡΕΣ 4 ^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	92

5. ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ Α/Γ 94 |

5.1 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΒΛΑΒΗΣ ΑΠΟ ΚΕΡΑΥΝΟ ΣΕ Α/Γ	94
5.1.1 Αξιολόγηση της συχνότητας πτώσης κεραυνού σε Α/Γ	95
5.1.2 Αποτίμηση της συχνότητας πληγμάτων σε Α/Γ με την χρήση θεωρητικών μοντέλων	101
5.1.3 Μέθοδοι υπολογισμού της συχνότητας κεραυνικών πληγμάτων	102

5.1.4 Επιλογή της στάθμης προστασίας με χρήση του προτύπου IEC 62305	104
5.1.5 Καθορισμός των σημείων που πλήττονται από κεραυνό σε μια Α/Γ με την μέθοδο της κυλιόμενης σφαίρας	108
5.2 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	111
5.2.1 Ζώνες αντικεραυνικής προστασίας	112
5.2.1.1 Αντικεραυνική προστασία πτερυγίων	112
5.2.1.2 Σύστημα σύλληψης κεραυνού στην επιφάνεια του πτερυγίου	116
5.2.1.3 Σύστημα σύλληψης κεραυνού στο εσωτερικό της επιφάνειας του πτερυγίου	116
5.2.1.4 Συγκολλητικές μεταλλικές ταινίες	117
5.2.1.5 Αγωγιμα υλικά της επιφάνειας του πτερυγίου	118
5.2.1.6 Αποτελεσματικότητα σύλληψης του κεραυνού	118
5.2.1.7 Διαστάσεις των υλικών που χρησιμοποιούνται για την αντικεραυνική προστασία των πτερυγίων	119
5.2.1.8 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διαφόρων μεθόδων αντικεραυνικής προστασίας των πτερυγίων	122
5.2.1.9 Σύνδεση των πτερυγίων με την πλήμνη περιστροφής και την νασέλλα της ανεμογεννήτριας	124
5.2.1.10 Δοκιμές σε πτερύγια με σύστημα αντικεραυνικής	126
5.2.1.11 Πείραμα πτερυγίου τύπου JSW J40-a	134
5.3 ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ ΕΔΡΑΝΩΝ ΚΥΛΙΣΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΚΙΒΩΤΙΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ	136
5.3.1 Αγωγοί καθόδου	138
5.4 ΔΙΑΔΡΟΜΕΣ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΤΑ ΜΕΡΗ ΜΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ...	142
5.4.1 Οι διαδρομές του κεραυνικού ρεύματος στο εσωτερικό της νασέλλας και του πύργου	144
5.4.2 Η διαδρομή του κεραυνικού ρεύματος από την πλήμνη περιστροφής στη νασέλλα	145
5.4.3 Η διαδρομή του κεραυνικού ρεύματος στην νασέλλα	146
5.4.4 Η διαδρομή του κεραυνικού ρεύματος δια μέσου του εδράνου του συστήματος προσανατολισμού	147
5.4.5 Όδευση καλωδίων εξωτερικά του πύργου	148
5.5 ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΟ	149

5.6 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΕΝΑΝΤΙ ΥΠΕΡΤΑΣΕΩΝ	152
5.6.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά των συστημάτων SPDs	153
5.6.2 Συστήματα SPDs σε διάφορα δίκτυα	155
5.6.3 Συμπέρασμα	156
5.7 Η ΘΩΡΑΚΙΣΗ ΚΑΙ Η ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΠΟΥ ΒΡΙΣΚΕΤΑΙ ΣΤΗΝ ΚΟΡΥΦΗ ΤΟΥ ΠΥΡΓΟΥ	156
5.7.1 Χρήση απαγωγέων και πυκνωτών υπέρτασης στην γεννήτρια	157
5.7.2 Η θωράκιση και η προστασία των καλωδίων	159
5.8 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	160
5.8.1 Τεχνικές προστασίας του ηλεκτρονικού συστήματος της ανεμογεννήτριας	161
5.9 ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	164
5.9.1 Ορισμοί	164
5.9.2 Ο ρόλος του εδάφους	165
5.9.3 Η μέθοδος των 4 ακροδεκτών του Wenner για την μέτρηση της ειδικής αντίστασης	166
5.9.4 Αντίσταση γείωσης	167
5.9.5 Η συνηθισμένη χρήση των ηλεκτροδίων για την αντίσταση γείωσης	167
5.9.6 Τύποι ηλεκτροδίων γείωσης σύμφωνα με τους κανονισμούς του IEC 62305	168
5.9.7 Μέθοδοι γείωσης μιας ανεμογεννήτριας	171
5.10 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΤΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΜΕΡΗ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	171
5.10.1 Αντικεραυνική προστασία πτερυγίων	171
5.10.2 Αντικεραυνική προστασία νασέλλας	174
5.10.3 Αντικεραυνική προστασία πύργου	177
5.10.4 Αντικεραυνική προστασία και σύστημα γείωσης της βάσης	179
5.10.5 Αναπαράσταση κατασκευής της βάσης και του συστήματος γείωσης ..	185
ΑΝΑΦΟΡΕΣ 5 ^ο Υ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	194

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πτώση κεραυνών είναι μία από τις κυριότερες αιτίες βλαβών σε Ανεμογεννήτριες (Α/Γ) οδηγώντας σε σημαντικές απώλειες της προβλεπόμενης παραγόμενης ισχύος και κάνοντας την ανάγκη για αντικεραυνική προστασία ιδιαίτερα έντονη.

Στην παρούσα εργασία γίνεται λεπτομερή περιγραφή στη κατασκευή, στη δομή και στο τρόπο λειτουργίας της ανεμογεννήτριας.

Έπειτα περιγράφονται τα χαρακτηριστικά και ο τρόπος δημιουργίας των κεραυνών.

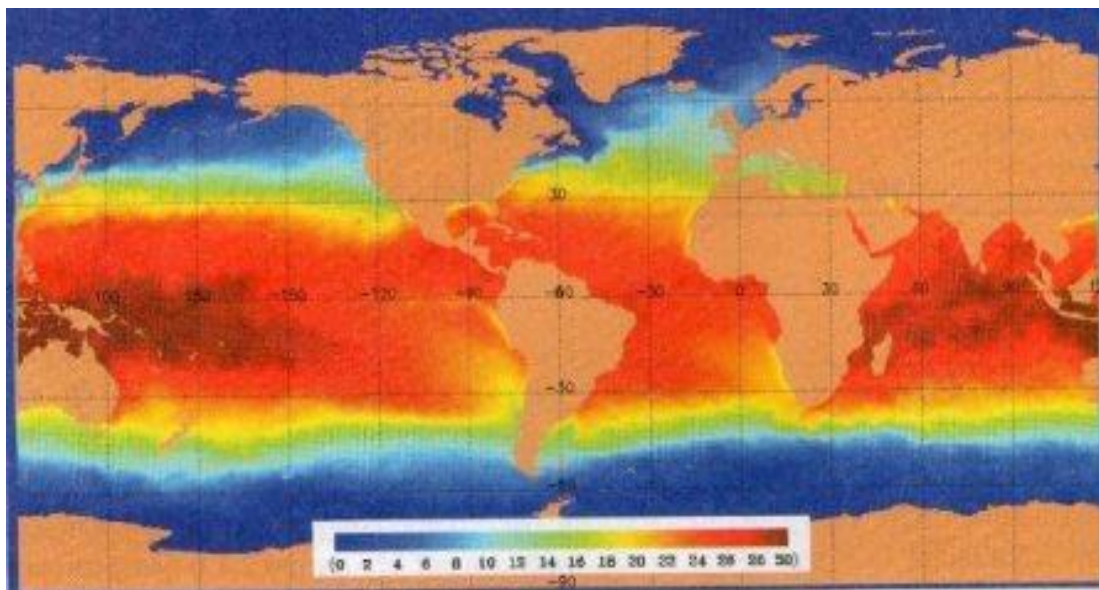
Στη συνέχεια περιγράφονται οι τρόποι με τους οποίους προκαλούνται βλάβες στις ανεμογεννήτριες λόγω πτώσης κεραυνών καθώς και οι υπάρχουσες μέθοδοι αντικεραυνικής προστασίας των επιμέρους μερών της ανεμογεννήτριας και όλης της κατασκευής σύμφωνα με τα διάφορα διεθνή πρότυπα.

2. ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση των προβλημάτων που εμφανίζονται σε μια ανεμογεννήτρια λόγω πληγμάτων κεραυνού, αλλά και στην αντιμετώπιση αυτών, κρίθηκε σκόπιμο να γίνει μια παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών της ανεμογεννήτριας. Αρχικά θα γίνει αναφορά στην αιολική ενέργεια και στους λόγους για τους οποίους καθίσταται σημαντική η αξιοποίησή της, καθώς και στην γενική λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε την ακριβή δομή της και την λειτουργία των επιμέρους στοιχείων, ενώ το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παράθεση στατιστικών σχετικά με την εγκαταστημένη ισχύ τόσο στον ελλαδικό όσο και στον ευρωπαϊκό χώρο.

2.1 Αιολική ενέργεια [1]

Γενικά αιολική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου. Η ενέργεια αυτή χαρακτηρίζεται "ήπια μορφή ενέργειας" και περιλαμβάνεται στις "καθαρές" πηγές όπως συνηθίζονται να λέγονται οι πηγές ενέργειας που δεν εκπέμπουν ή δεν προκαλούν ρύπους. Η αρχαιότερη μορφή εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας ήταν τα ιστία (πανιά) των πρώτων ιστιοφόρων πλοίων και πολύ αργότερα οι ανεμόμυλοι στη ξηρά. Ονομάζεται αιολική γιατί στην ελληνική μυθολογία ο Αίολος ήταν ο θεός του ανέμου. Η αιολική ενέργεια οφείλει την προέλευση της στον ήλιο. Ο ήλιος ακτινοβολεί ετησίως στη γη ισχύ 178.000 TW που είναι ίση με 15.000 φορές την παρούσα Παγκόσμια ζήτηση. Από αυτήν το 30% αντανακλάται αμέσως στο διάστημα. Το 50% απορροφάται και μετατρέπεται σε θερμότητα που αντανακλάται προς το διάστημα, ενώ το υπόλοιπο 20% δημιουργεί τους ανέμους, δίνει την απαραίτητη ισχύ για τον κύκλο του νερού και ενεργοποιεί τη φωτοσύνθεση. Οι περιοχές πλησίον του Ισημερινού (σε γεωγραφικό πλάτος $\varphi=0^\circ$) θερμαίνονται περισσότερο από τον ήλιο σε σχέση με τις άλλες. Αυτό φαίνεται καθαρά στην υπέρυθη φωτογραφία της εικόνας 2.1



Εικόνα 2.1 : Υπέρυθρη φωτογραφία από δορυφόρο. [1]

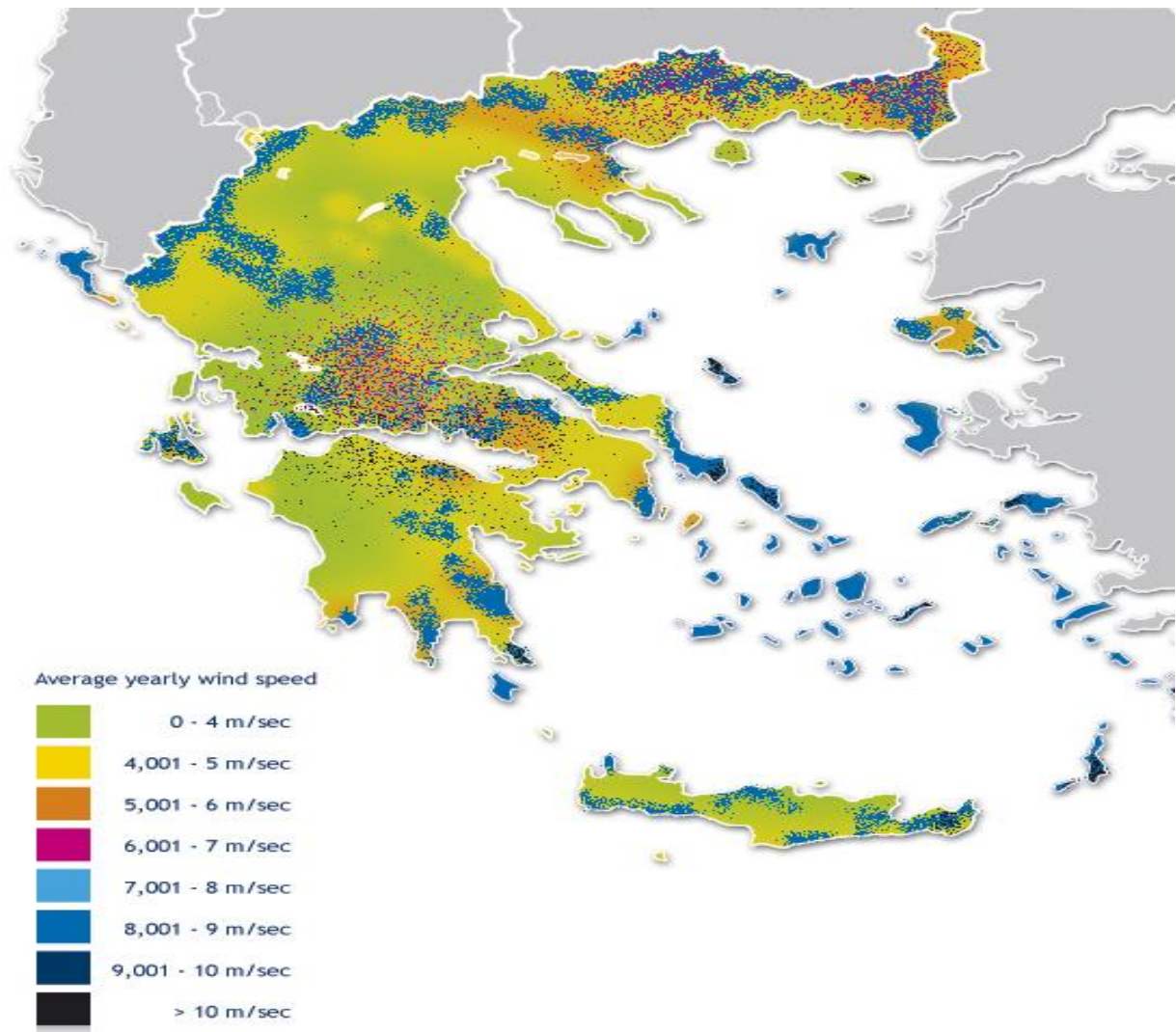
Καθώς ο αέρας θερμαίνεται, διαστέλλεται γίνεται πιο ελαφρύς και ανεβαίνει σε ύψος περίπου 10 km από το επίπεδο της θάλασσας και κατευθύνεται προς τα ψυχρότερα μέρη που είναι ο βορράς και ο νότος. Καθώς συμβαίνει αυτό η ατμοσφαιρική πίεση μειώνεται με αποτέλεσμα μάζες ψυχρού αέρα να κατευθύνονται προς την περιοχή του χαμηλού βαρομετρικού. Η κίνηση αυτή των αερίων μαζών δημιουργεί τον άνεμο. Εάν η γη δεν περιστρεφόταν γύρω από τον άξονα της, τότε ο θερμός αέρας πάνω από τους πόλους μετά την ψύξη του θα βυθιζόταν και θα επέστρεφε προς τον Ισημερινό. Στην φανταστική αυτήν περίπτωση το πεδίο κυκλοφορίας των ανέμων θα ήταν σταθερό. Η περιστροφή όμως της γης δημιουργεί μια δύναμη κάμψης γνωστή ως δύναμη Coriolis. Το αποτέλεσμα της δυνάμεως αυτής είναι ότι στο μεν βόρειο ημισφαίριο οι αέριες μάζες που μετακινούνται οριζόντια στρέφονται προς τα δεξιά ενώ στο νότιο ημισφαίριο στρέφονται προς τα αριστερά. Αν κάποιος παρατηρήσει από το διάστημα την κυκλοφορία των ανέμων, θα διαπιστώσει πως στο βόρειο ημισφαίριο η κίνηση είναι αντίθετη με αυτήν των δεικτών του ωρολογίου καθώς πλησιάζουμε σε περιοχή χαμηλών πιέσεων. Στο νότιο ημισφαίριο συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο με τον αέρα να περιστρέφεται σύμφωνα με την κίνηση των δεικτών του ωρολογίου. Η δύναμη Coriolis σε γεωγραφικό πλάτος 30° , τόσο στο βόρειο, όσο και στο νότιο ημισφαίριο, εμποδίζει τη μετακίνηση του αέρα σε μεγαλύτερο γεωγραφικό πλάτος. Σε αυτό το πλάτος δημιουργούνται περιοχές υψηλών πιέσεων και ο αέρας βυθίζεται προς την επιφάνεια της γης. Στους πόλους επίσης, λόγω της ψύξης του

αέρα δημιουργούνται περιοχές υψηλών πιέσεων. Τα φαινόμενα αυτά επιφέρουν τις ακόλουθες επικρατέστερες διευθύνσεις ανέμου:

Πλάτος	60-90 °	30-60°	0-30°	0-30°	30-60°	60-90°
Διεύθυνση ανέμου	Βορειο-ανατολική	Νοτιο-δυτική	Βορειο-ανατολική	Νοτιο-ανατολική	Βορειο-δυτική	Νοτιο-ανατολική

Πίνακας 2.1 : Διευθύνσεις ανέμου [1]

Οι άνεμοι που επικρατούν στην τροπόσφαιρα σε ύψος μεγαλύτερο των 1000 m AGL ονομάζονται και γεωστροφικοί άνεμοι. Η επιφάνεια της γης δεν επηρεάζει σημαντικά τις κινήσεις τους που καθοδηγούνται από θερμοκρασιακές διαφορές και τις συνακόλουθες διαφορές πίεσης. Οι μετρήσεις της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου σε αυτά τα ύψη πραγματοποιούνται με μετεωρολογικά μπαλόνια (radiosonde balloons). Οι άνεμοι που ενδιαφέρουν τις εφαρμογές αιολικής ενέργειας ονομάζονται επιφανειακοί άνεμοι και επηρεάζονται πολύ από την επιφάνεια της γης σε ύψη 0-200 m AGL. Η αιολική ενέργεια αποτελεί σήμερα μια ελκυστική λύση στο πρόβλημα της ηλεκτροπαραγωγής. Το «καύσιμο» είναι άφθονο, αποκεντρωμένο και δωρεάν. Δεν εκλύονται αέρια θερμοκηπίου και άλλοι ρύποι, και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι μικρές σε σύγκριση με τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής από συμβατικά καύσιμα. Επίσης, τα οικονομικά οφέλη μιας περιοχής από την ανάπτυξη της αιολικής βιομηχανίας είναι αξιοσημείωτα. [1]

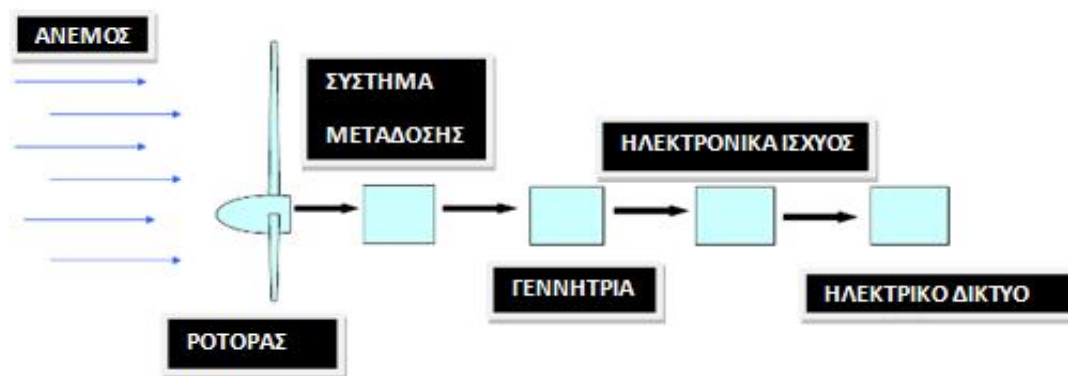


Εικόνα 2.2 : Αιολικός χάρτης της Ελλάδας. [2]

2.2. Γενική λειτουργία [3],[4]

Ο άνεμος περιστρέφει τα πτερύγια μιας ανεμογεννήτριας, τα οποία είναι συνδεδεμένα με ένα περιστρεφόμενο άξονα. Ο άξονας περνάει μέσα σε ένα κιβώτιο μετάδοσης της κίνησης όπου αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής. Το κιβώτιο συνδέεται με έναν άξονα μεγάλης ταχύτητας περιστροφής ο οποίος κινεί μια γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Εάν η ένταση του ανέμου ενισχυθεί πάρα πολύ, η ανεμογεννήτρια έχει ένα φρένο που περιορίζει την υπερβολική αύξηση περιστροφής των πτερυγίων για να περιοριστεί η φθορά της και να αποφευχθεί η καταστροφή της. [3]

Η ταχύτητα του ανέμου πρέπει να είναι περισσότερο από 15 kph για να μπορέσει μια κοινή τουρμπίνα να παράγει ηλεκτρισμό. Συνήθως παράγουν 50-300 Kw η κάθε μία. Ένα Kw ηλεκτρικού ρεύματος μπορεί να ανάψει 100 λάμπες των 100w. Καθώς η γεννήτρια περιστρέφεται παράγει ηλεκτρισμό με τάση 25.000 Volt. Το ηλεκτρικό ρεύμα περνάει πρώτα από ένα μετασχηματιστή στην ηλεκτροπαραγωγική μονάδα ο οποίος ανεβάζει την τάση του στα 400.000 Volt. Όταν το ηλεκτρικό ρεύμα διανύει μεγάλες αποστάσεις είναι καλύτερα να έχουμε υψηλή τάση. [4]



Σχήμα 2.1 : Σχηματική αναπαράσταση μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική με Α/Γ . [3]

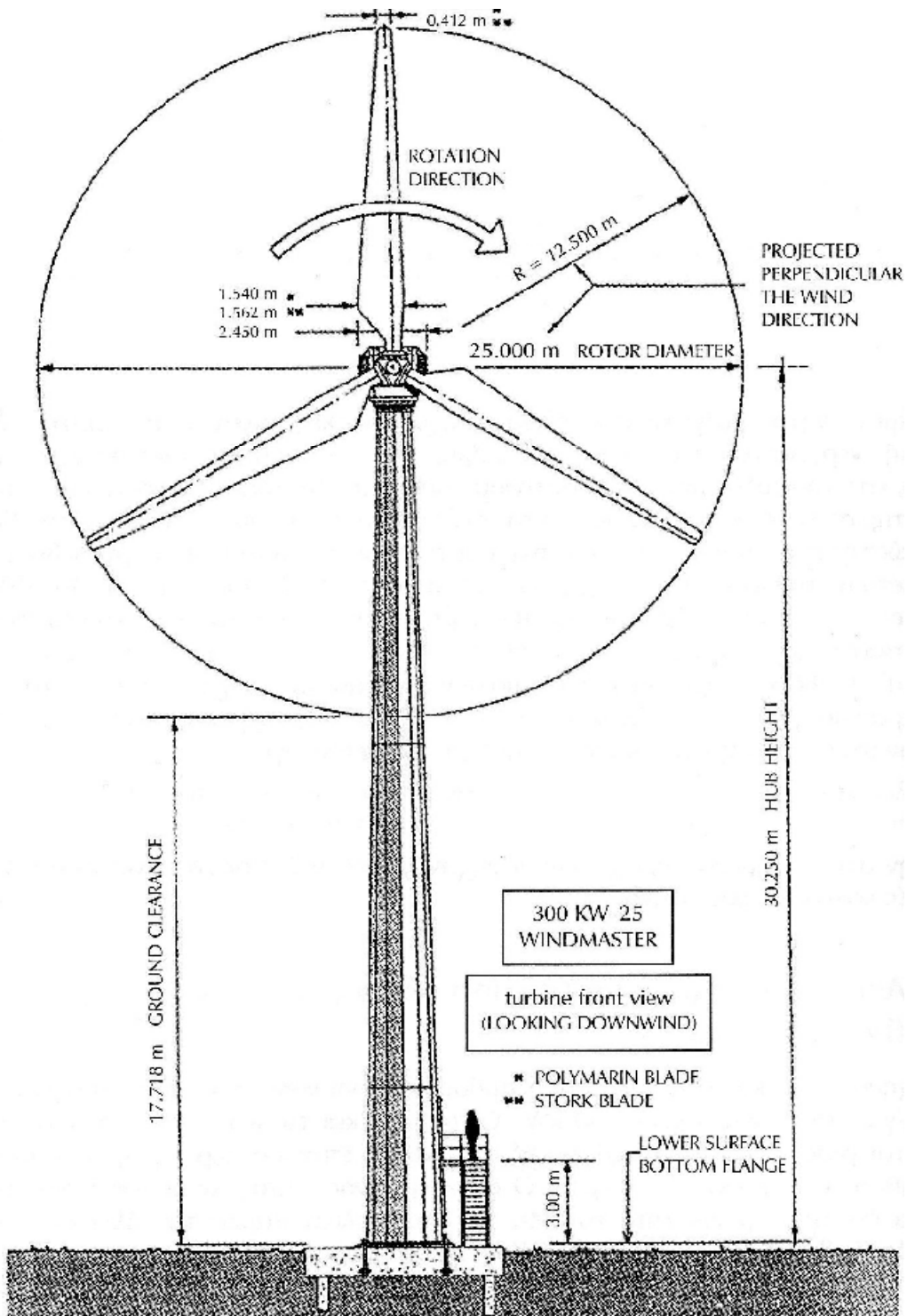
Η σημερινή τεχνολογία βασίζεται σε ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα 2 ή 3 πτερυγίων, με αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύος έως 5000kW, ενώ υπάρχουν και οι μηχανές κατακόρυφου άξονα.

Εμείς θα ασχοληθούμε με τις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα εφόσον αυτές κυριαρχούν στην σημερινή αγορά. Όταν εντοπιστεί μια ανεμώδης περιοχή – και εφόσον βέβαια έχουν προηγηθεί οι απαραίτητες μετρήσεις και μελέτες – για την αξιοποίηση του αιολικού της δυναμικού τοποθετούνται μερικές δεκάδες ανεμογεννήτριες, οι οποίες απαρτίζουν ένα «αιολικό πάρκο». Αρχικά ανυψώνεται ο πύργος και τοποθετείται τμηματικά πάνω στα θεμέλια. Μετά ανυψώνεται η άτρακτος στην κορυφή του πύργου. Στη βάση του πύργου συναρμολογείται ο ρότορας ή δρομέας (οριζοντίου άξονα, πάνω στον οποίο είναι προσαρτημένα τα πτερύγια), ο οποίος αποτελεί το κινητό μέρος της ανεμογεννήτριας. Η άτρακτος περιλαμβάνει το σύστημα μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Στη συνέχεια ο ρότορας

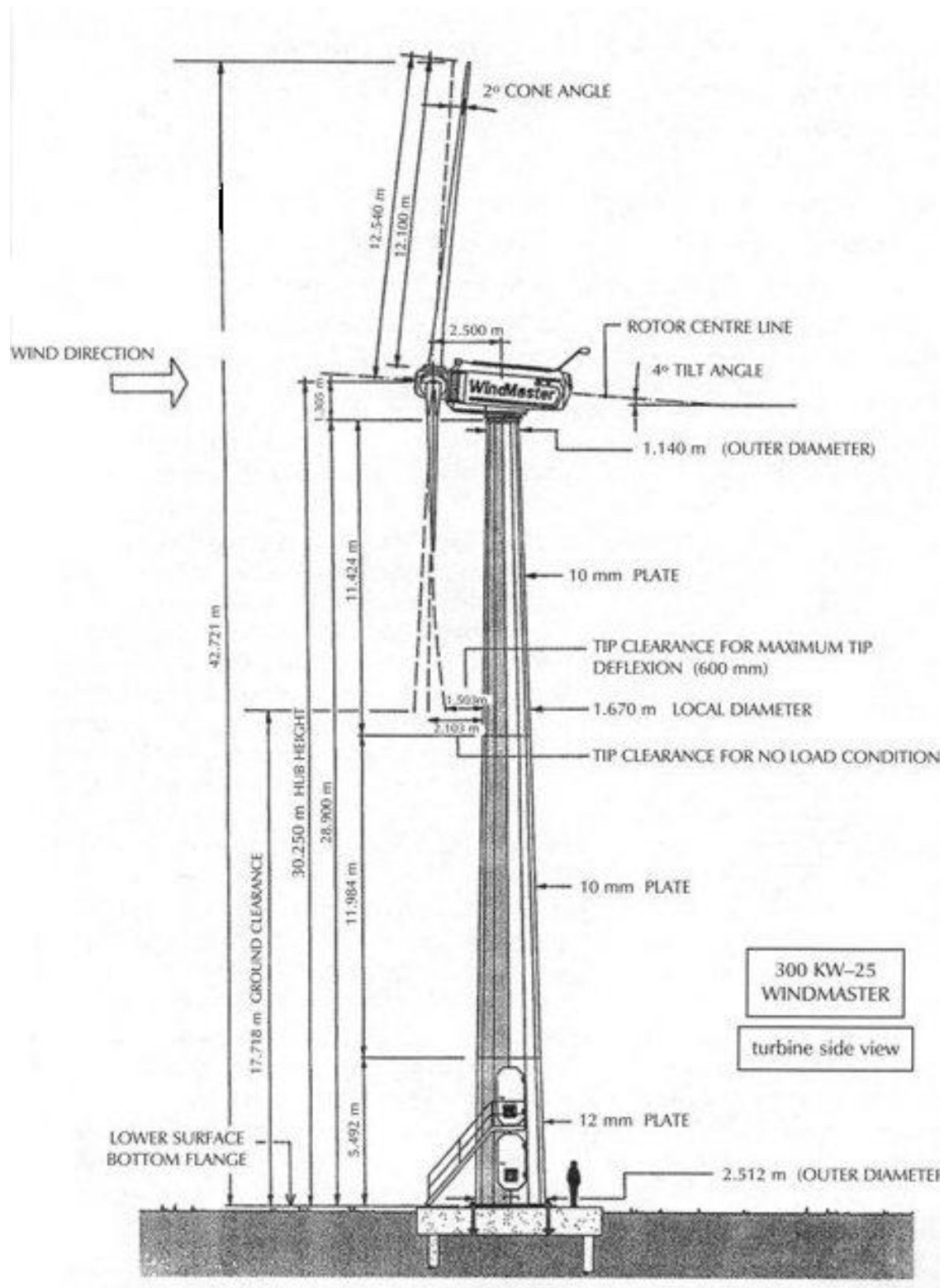
ανυψώνεται και συνδέεται στην άτρακτο. Τέλος, γίνονται οι απαραίτητες ηλεκτρικές συνδέσεις.

2.3 Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα, Α/Γ Ο.Α. (horizontal axis WTs) [6]

Στις εικόνες 2.3 και 2.4 φαίνονται η πρόσοψη (front view) και η πλάγια όψη (side view) μιας Α/Γ ονομαστικής ισχύος 300 kW. Όπως λέει και το όνομα τους τα πτερύγια τους κινούνται γύρω από έναν οριζόντιο άξονα, ενώ το επίπεδο περιστροφής βρίσκεται σχεδόν κάθετα στη φορά του ανέμου. Ο συγκεκριμένος τύπος ανεμογεννήτριας βρίσκεται σήμερα εγκατεστημένος από το 1992 σε δύο αιολικά πάρκα της ΔΕΗ ΑΕ στις θέσεις Μαρμάρι Ευβοίας και Μονή Τοπλού Κρήτης. Με τα σημερινά δεδομένα αυτή θεωρείται «μηχανή μικρής ισχύος, αν σκεφτεί κανείς ότι υπάρχουν και λειτουργούν γίγαντες των 3 MW ενώ το 2005 μπήκε σε λειτουργία μηχανή των 5 MW.



Εικόνα 2.3 : Ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα WindMaster 300/25 [6]



Εικόνα 2.4 : Πλάγια όψη Α/Γ WindMaster 300/25 [6]

Τα πρώτα στοιχεία που πρέπει να γνωρίζουμε για μία ανεμογεννήτρια είναι:

- Η ονομαστική ισχύς (nominal power) της Α/Γ: P (300 kW)

Η ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου και πιο συγκεκριμένα είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας αυτής. Δίνεται από την εξίσωση:

$$P_w = (1/2) \cdot \rho \cdot C_p \cdot A \cdot V_w^3,$$

όπου:

ρ είναι η πυκνότητα αέρα (kg/m^3),

$A = \pi R^2$ (m^2) είναι το εμβαδό του “κυκλικού δίσκου” που διαγράφει η έλικα,

V_w είναι η ταχύτητα του ανέμου (m/s),

C_p είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος (μονόμετρο μέγεθος).

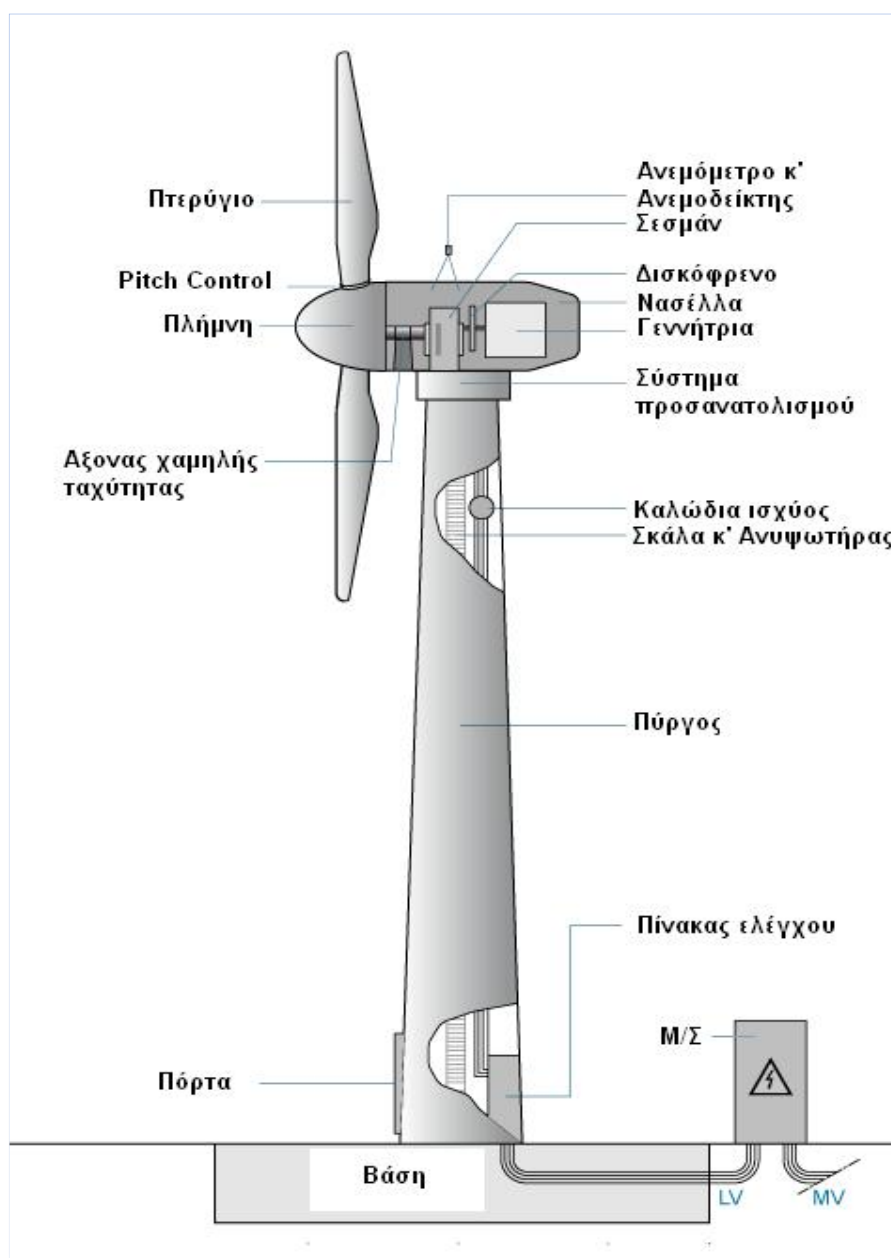
- Η διάμετρος (diameter) του δρομέα: D (25 m)
- Η επιφάνεια του δρομέα = $\pi (D/2)^2$ ($490,6 \text{ m}^2$)
- Το ύψος του άξονα περιστροφής (hub height), ή ύψος πλήμνης: H_r (30,25 m)
- Το ανώτατο ύψος που φτάνει το πτερύγιο: H_t (42,72 m)
- Το κατώτατο ύψος (ground clearance) που φτάνει το πτερύγιο: H_c , (17,71 m)

Ο θάλαμος μηχανισμών (nacelle) ή κλωβός ή κουβούκλιο όπου υπάρχουν το κιβώτιο ταχυτήτων, η γεννήτρια και τα λοιπά συστήματα της μηχανής (σε παρενθέσεις είναι τα στοιχεία της ΑΓ της εικόνας 2.3) Οι μηχανές έχουν συνήθως τρία πτερύγια, ενώ υπάρχουν Μηχανές με δύο ή ακόμη και με ένα πτερύγιο (monopterous). Κατά τη λειτουργία τους οι ΑΓ καταπονούνται δυναμικά και υπόκεινται σε ταλαντώσεις. Τα φορτία στα πτερύγια μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της περιστροφής λόγω της καθ' ύψος μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου (ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα). Αυτό έχει ως συνέπεια η ροπή στα πτερύγια να παρουσιάζει κυκλική μεταβολή. Η μεταβολή αυτή είναι ασθενής στις τριπτέρυγες ΑΓ που προτιμώνται σήμερα για αυτόν το λόγο.

Οι μεταβολές των φορτίων λόγω του οριακού στρώματος επιβάλλουν την κλίση του άξονα περιστροφής ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Στην εικόνα 2.4 φαίνεται η κλίση προς τα πάνω κατά 4° (tilt angle). Η αεροδυναμική ανάλυση του δρομέα αποδεικνύει ότι η κλίση συμβάλλει στη μείωση των φορτίων. Επιπρόσθετα η κλίση δημιουργεί την κατάλληλη απόσταση (1503 mm) που αποκλείει τη σύγκρουση των περιστρεφόμενων πτερυγίων.

Η κωνικότητα των πτερυγίων (cone angle) μειώνει επίσης στο ελάχιστο τις καμπτικές τάσεις στα πτερύγια. Όλες οι σύγχρονες Α/Γ Ο.Α. έχουν το δρομέα ανάντι του πυλώνα στήριξης. Οι μηχανές που έχουν το δρομέα κατάντι έχουν το πλεονέκτημα του αυτόματου προσανατολισμού, αλλά οι διαταραχές που προκαλεί ο πυλώνας στη ροή του ανέμου επάγουν ανεπιθύμητες μεταβολές στα αεροδυναμικά φορτία κατά τη διέλευση του πτερυγίου (φαινόμενο σκίασης πυλώνα), καθώς επίσης αυξάνουν τον αεροδυναμικό θόρυβο κατά τη λειτουργία. Για τους λόγους αυτούς προτιμώνται οι Α/Γ με πτερύγια προσανατολισμένα ανάντι του πυλώνα. [6]

Στην εικόνα 2.5 απεικονίζονται τα βασικά τμήματα μιας ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 2.5 : Βασικά τμήματα Α/Γ. [4]

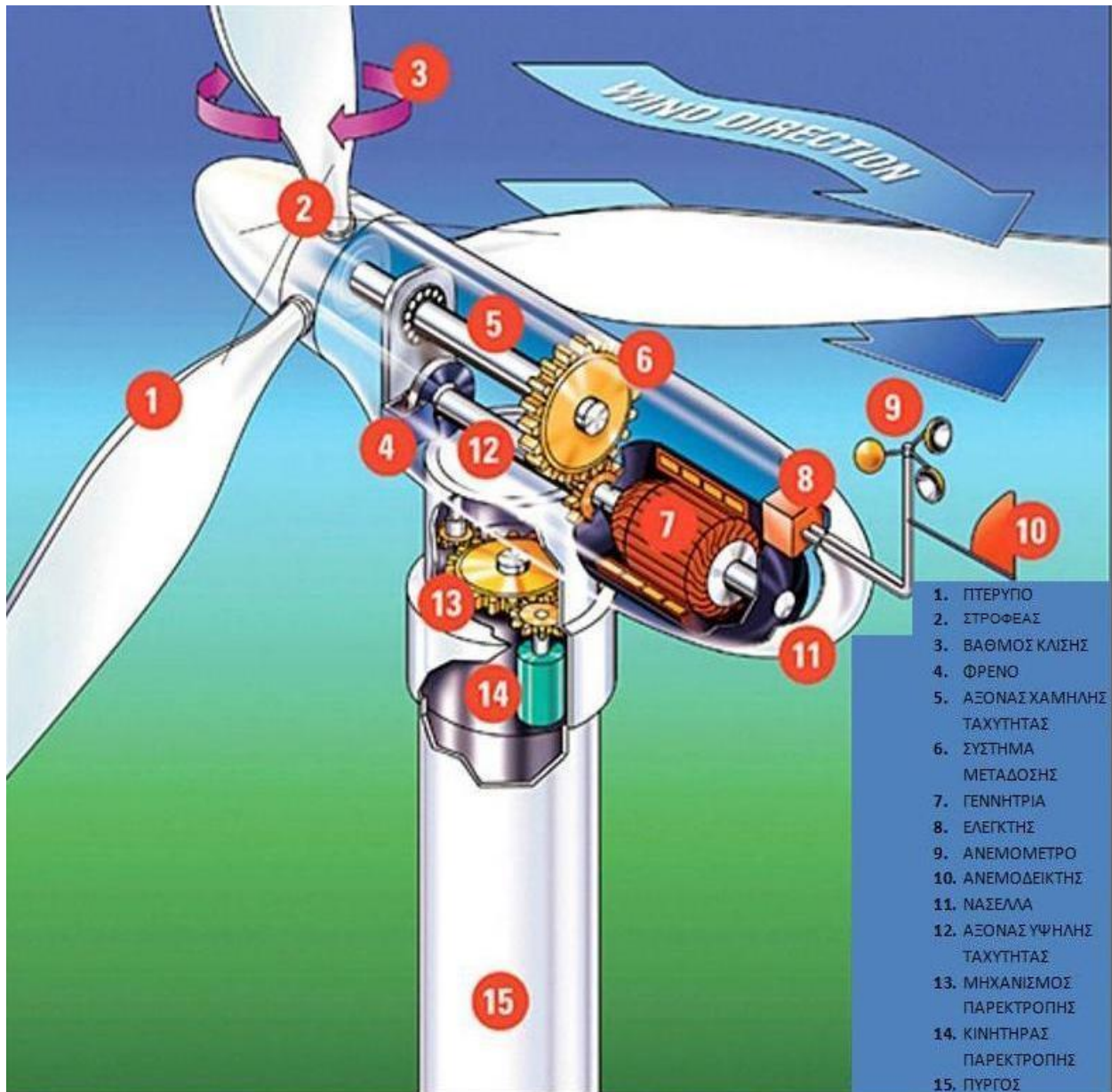
2.4.Δομή ανεμογεννήτριας

Η ανεμογεννήτρια αποτελείται από τρία κυρίως μέρη, τα οποία με την σειρά τους αποτελούνται από άλλα επιμέρους στοιχεία. Τα κύρια δομικά μέρη της Α/Γ είναι τα εξής:

1. Νασέλλα
2. Πύργος
3. Βάση

2.4.1 Νασέλλα [7],[8],[9]

Η νασέλλα είναι τοποθετημένη στην κορυφή του πύργου της ανεμογεννήτριας. Στη νασέλλα στεγάζονται πλήθος στοιχείων όπως φαίνεται στην εικόνα 2.6.



Εικόνα 2.6 : Νασέλλα Α/Γ [15]

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα στοιχεία αυτά:

- **Στροφέας:** Ο στροφέας περιστρέφεται από τον άνεμο ξεκινώντας έτσι την διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αποτελείται από 2 ή 3 πτερύγια και την πλήμνη στην οποία είναι τοποθετημένα. Παρά το γεγονός ότι οι στροφείς με 2 πτερύγια γλιτώνουν το κόστος και το βάρος ενός επιπλέον πτερυγίου, έχουν επικρατήσει οι στροφείς με 3 πτερύγια. Αυτό συμβαίνει γιατί ένας στροφέας με 2 πτερύγια χρειάζεται μεγαλύτερη περιστροφική ταχύτητα για παράγει την ίδια

ενέργεια. Δύο ακόμη μειονεκτήματά τους είναι ο αυξημένος θόρυβος και τα προβλήματα ευστάθειας για ανεμογεννήτριες με άκαμπτη κατασκευή.

- *Πτερύγια*: Το βασικό χαρακτηριστικό των πτερυγίων είναι το αεροδυναμικό τους σχήμα που διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοσή τους. Ακόμα και μικρές αλλαγές στον σχεδιασμό τους μπορούν να αλλάξουν την καμπύλη της ασκούμενης δύναμης καθώς και το επίπεδο θορύβου. Η βάση τους είναι στερεωμένη στην πλήμνη. Η πίσω πλευρά του πτερυγίου είναι πιο κυρτή από την μπροστινή. Αυτό σε συνδυασμό με το αεροδυναμικό σχήμα προκαλούν την περιστροφή του πτερυγίου. Το πλάτος, το πάχος και η συστροφή των πτερυγίων είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ της ανάγκης για αεροδυναμικό σχήμα και της ανάγκης για ανθεκτικότητα. Τα σύγχρονα πτερύγια κατασκευάζονται από ελαφρύ πλαστικό ενισχυμένο με γυαλί, ενώ μικρότερου μεγέθους πτερύγια κατασκευάζονται από αλουμίνιο ή λεπτά στρώματα ξύλου.
- *Πλήμνη*: Τα πτερύγια σε όλες τις ανεμογεννήτριες στερεώνονται στην πλήμνη. Η πλήμνη κατασκευάζεται από έναν ειδικό τύπο ισχυρού κράματος σιδήρου που ονομάζεται “SG χυτοσίδηρος”. Λόγω του περίπλοκου σχήματός της (είναι δύσκολο να κατασκευαστεί αλλιώς), είναι πολύ βολικό να χρησιμοποιηθεί χυτοσίδηρος.
- *Pitch control(βαθμός κλίσης)*: Σε περιπτώσεις ισχυρών ανέμων είναι απαραίτητο μέρος της επιπλέον ενεργείας του ανέμου να «θυσιάζετε» προκειμένου να προφυλαχτεί ο εξοπλισμός της ανεμογεννήτριας. Το pitch control είναι ο πιο συνηθισμένος τρόπος ελέγχου της αεροδυναμικής ισχύος που παράγεται από το δρομέα της ανεμογεννήτριας. Επίσης έχει σημαντική επίδραση σε όλα τα αεροδυναμικά φορτία που παράγονται από το δρομέα(που είναι τύπου έλικα) . Στις ανεμογεννήτριες με ελεγχόμενο βήμα έλικα, ο ηλεκτρονικός ελεγκτής ελέγχει την έξοδο τους αρκετές φορές το δευτερόλεπτο. Όταν η έξοδος γίνει αρκετά μεγάλη, στέλνει εντολή στο μηχανισμό περιστροφής του πτερυγίου ο οποίος αμέσως στρέφει τα πτερύγια προς τον αέρα. Γι' αυτό τα πτερύγια πρέπει να είναι σε θέση να περιστρέφονται κατά μήκος του άξονα τους. Κατά τη διάρκεια κανονικής λειτουργίας τα πτερύγια θα στρέφονται με μια γωνία μιας μοίρας τη φορά- ενώ ταυτόχρονα θα στρέφεται και ο δρομέας. Ο σχεδιασμός τέτοιου είδους ανεμογεννητριών απαιτεί έξυπνη μηχανική ώστε τα πτερύγια να στρέφονται ακριβώς την απαιτούμενη γωνία. Ο έλεγχος αυτός κάθε φορά που αλλάζει διεύθυνση ο αέρας στρέφει τα πτερύγια μερικές μοίρες ώστε να διατηρεί τη γωνία πρόσπτωσης ιδανική για να μεγιστοποιεί την έξοδο

- **Φρένο:** Δισκόφρενο τοποθετημένο στον άξονα υψηλής ταχύτητας που μπορεί να εφαρμοστεί μηχανικά, ηλεκτρικά ή υδραυλικά για να σταματήσει τον στροφέα σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης ή όταν πρέπει να γίνουν εργασίες επισκευής ή συντήρησης στην ανεμογεννήτρια. Στην πράξη το φρενάρισμα επιτελείται από ένα στοιχείο που ονομάζεται διαβήτης του φρένου. Εξασφαλίζει ακόμη ότι αφού σταματήσει ο στροφέας, δεν θα ξεκινήσει να περιστρέφεται. Το δισκόφρενο κατασκευάζεται από ατσάλι. Επειδή το φρενάρισμα προκύπτει από την τριβή μεταξύ του φρένου και του δίσκου, τα φρένα των ανεμογεννητριών δέχονται μεγάλες πιέσεις. Γι' αυτό κατασκευάζονται από ειδικό μεταλλικό κράμα ικανό να αντέχει ακόμα και σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες της τάξης των 700 βαθμών Κελσίου.
- **Άξονας χαμηλής ταχύτητας:** Συνδέεται μεταξύ του στροφέα και του συστήματος μετάδοσης. Ο στροφέας κινεί τον άξονα και αυτός με την σειρά του κινεί το σύστημα μετάδοσης. Κατασκευάζεται από ενισχυμένο χάλυβα, έτσι ώστε να μεταφέρει τις ισχυρές μη μόνιμες ροπές, ενώ η έδραση του γίνεται συνήθως σε δύο έδρανα ικανά να αντέχουν τόσο το βάρος του άξονα όσο και τα εξασκούμενα φορτία από την κινητική ενέργεια που μεταδίδεται μέσω των πτερυγίων.
- **Σύστημα μετάδοσης (κιβώτιο ταχυτήτων):** Τα γρανάζια συνδέουν τον άξονα χαμηλής ταχύτητας με τον άξονα υψηλής ταχύτητας και αυξάνουν τις ταχύτητες περιστροφής από περίπου 30 έως 60 περιστροφές το λεπτό (rpm = περιστροφή ανά λεπτό) σε 1000 έως 1800 περιστροφές το λεπτό, που είναι η ταχύτητα περιστροφής που οι περισσότερες ανεμογεννήτριες απαιτούν ώστε να παραγάγουν ηλεκτρισμό. Το σύστημα κίνησης περιλαμβάνει επίσης υδραυλικό ή μηχανικό φρένο και ελαστικούς συνδέσμους απορρόφησης ταλαντώσεων. Το μηχανικό φρένο της ανεμογεννήτριας τοποθετείται είτε στον άξονα υψηλής ταχύτητας περιστροφής οπότε απαιτείται μικρή σχετικά δύναμη ροπής πέδησης, αλλά δεν προστατεύεται η πτερωτή από απώλεια φορτίου ή θραύση του συστήματος μετάδοσης κίνησης, είτε στον άξονα χαμηλής ταχύτητας περιστροφής. Στην τελευταία περίπτωση λόγω της μεγάλης ροπής πέδησης απαιτείται φρένο αυξημένων διαστάσεων, βάρους και κόστους. Στην περίπτωση όμως αυτή προστατεύεται καλύτερα η πτερωτή και το κιβώτιο μετάδοσης, γι' αυτό και αποτελεί τη βέλτιστη τεχνικά λύση.

- *Γεννήτρια:* Για την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιούνται κυρίως σύγχρονες και ασύγχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος και σπανίως ηλεκτρικές γεννήτριες συνεχούς ρεύματος. Η απλότητα στην κατασκευή και η ευκολία με την οποία συνδέεται στο δίκτυο η ασύγχρονη γεννήτρια, είναι το πλεονέκτημα της. Όμως η ανάγκη να παίρνει ρεύμα μαγνήτισης από το δίκτυο δημιουργεί προβλήματα όταν η ισχύς της ανεμογεννήτριας είναι συγκρίσιμη με την ισχύ του ηλεκτρικού δικτύου.
- *Ελεγκτής:* Ο ελεγκτής είναι ένα από τα σημαντικότερα τμήματα της ανεμογεννήτριας αφού συμμετέχει στην λήψη αποφάσεων για όλα σχεδόν τα ζητήματα ασφαλείας. Η βασική λειτουργία του είναι να δίνει εντολές στον κινητήρα παρεκτροπής σχετικά με το πόσο και προς τα πού να στρέψει την νασέλλα έτσι ώστε ο στροφέας να βρίσκεται πάντα κόντρα στην ροή του ανέμου. Επιπλέον ανάλογα με τα δεδομένα που λαμβάνει από το ανεμόμετρο, είτε θέτει σε λειτουργία τον στροφέα (για ταχύτητες αέρα 8-16 μίλια ανά ώρα), είτε ενεργοποιεί το φρένο για να σταματήσει την περιστροφή του στροφέα τόσο για μεγάλες ταχύτητες αέρα (πάνω από 65 μίλια ανά ώρα- κίνδυνος υπερθέρμανσης της γεννήτριας) όσο και για πολύ μικρές (οικονομικά ασύμφορη λειτουργία). Εκτός όμως από τις προαναφερθείσες λειτουργίες ο ελεγκτής μετράει και άλλες παραμέτρους είτε ως αναλογικά, είτε ως ψηφιακά σήματα . Αυτές είναι η τάση, το ρεύμα, η συχνότητα, η θερμοκρασία (της νασέλλας και της γεννήτριας), το επίπεδο υδραυλικής πίεσης, το επίπεδο δόνησης, η συστροφή των καλωδίων ισχύος, η υπερθέρμανση των κινητήρων και της γεννήτριας ενώ επιτελεί και την ρύθμιση του διαβήτη του φρένου.
- *Ανεμόμετρο:* Μετρά την ταχύτητα του αέρα και διαβιβάζει τα δεδομένα της μέτρησης στον ελεγκτή.
- *Ανεμοδείκτης:* Ο ανεμοδείκτης στρέφεται από τον αέρα. Στην συνέχεια ενημερώνει τον ελεγκτή σχετικά με την κατεύθυνση του ανέμου και ο ελεγκτής δίνει εντολή στον μηχανισμό παρεκτροπής.
- *Άξονας υψηλής ταχύτητας:* Συνδέεται μεταξύ του συστήματος μετάδοσης και της γεννήτριας. Το σύστημα μετάδοσης κινεί τον άξονα και αυτός με την σειρά του κινεί την γεννήτρια παρέχοντάς της την απαιτούμενη υψηλή ταχύτητα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

- *Μηχανισμός παρεκτροπής:* Κάθε φορά που αλλάζει η κατεύθυνση του ανέμου, παίρνει εντολή από τον ελεγκτή και στρέφει τον στροφέα έτσι ώστε να είναι κόντρα στην ροή του αέρα. Ουσιαστικά πρόκειται για έναν τροχό που στρέφει ολόκληρη την νασέλλα.
- *Κινητήρας παρεκτροπής:* Θέτει σε κίνηση τον τροχό του μηχανισμού παρεκτροπής και όπως φαίνεται στο σχήμα βρίσκεται ακριβώς από κάτω του. [7],[8],[9]

2.4.2 Πύργος [7]

Ο πύργος μιας Α/Γ υποστηρίζει το σύστημα της ατράκτου το οποίο ζυγίζει αρκετούς τόνους και ανυψώνει το δρομέα σε ύψος όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι αρκετά μεγαλύτερη και λιγότερο διαταραγμένη σε σχέση με το έδαφος. Στο εσωτερικό του υπάρχει μια σκάλα για το προσωπικό και ένας ανελκυστήρας για τα εργαλεία και τον εξοπλισμό (Εικόνα 2.7).



Εικόνα 2.7 : Εσωτερικό πύργου ανεμογεννήτριας. [16]

Τα βασικά χαρακτηριστικά του πύργου είναι το ύψος και το υλικό κατασκευής.

∅ Το *ύψος* του πύργου είναι σημαντικός παράγοντας που λαμβάνεται υπ' όψιν κατά τον σχεδιασμό μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα. Σκοπός του πύργου είναι να υψώνει την ανεμογεννήτρια όσο το δυνατόν ψηλότερα. Ο άνεμος έχει μεγαλύτερες ταχύτητες σε μεγάλα ύψη. Η μεταβολή της ταχύτητας με το ύψος, που ονομάζεται διάτμηση ανέμου, είναι εντονότερη κοντά στην επιφάνεια. Χαρακτηριστικά κατά την διάρκεια της ημέρας η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου είναι ανάλογη με την έβδομη ρίζα του ύψους. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι ο διπλασιασμός του ύψους του πύργου αυξάνει τις αναμενόμενες ταχύτητες αέρα κατά 10% και την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια κατά 34%. Βέβαια από τον διπλασιασμό του ύψους συνεπάγεται και διπλασιασμός της διαμέτρου, δηλαδή περισσότερο υλικό άρα και μεγαλύτερο κόστος κατασκευής. Στη διάρκεια της νύχτας, ή καλύτερα: όταν η ατμόσφαιρα γίνεται σταθερή, η ταχύτητα του ανέμου κοντά στο έδαφος, συνήθως υποχωρεί, ενώ στο ύψος που βρίσκεται ο στροφέας της ανεμογεννήτριας όχι μόνο δεν μειώνεται πολύ, αλλά μπορεί ακόμα και να αυξηθεί. Κατά συνέπεια η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη και η ανεμογεννήτρια θα παράγει περισσότερη ενέργεια απ' ό,τι την διάρκεια της ημέρας. Σε αυτήν την περίπτωση διπλασιάζοντας το ύψος η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να αυξηθεί από 20% έως και 60%.

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι η επιλογή του ύψους του πύργου είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ της αύξησης της παραγόμενης ενέργειας και της αύξησης του κόστους κατασκευής. Ο συμβιβασμός αυτός επιτυγχάνεται για ύψη διπλάσια ή τριπλάσια από το μήκος των πτερυγίων. [7]

∅ Το *υλικό κατασκευής* [10] του πύργου μιας Α/Γ ποικίλλει. Οι πύργοι για μεγάλες ανεμογεννήτριες μπορεί να είναι σωληνοειδείς χαλύβδινοι πύργοι, πύργοι δικτυωτού πλέγματος ή συμπαγείς τσιμεντένιοι πύργοι. Καλωδιωτοί σωληνοειδής πύργοι χρησιμοποιούνται μόνο για μικρές ανεμογεννήτριες.

- *Σωληνοειδείς χαλύβδινοι πύργοι:* Οι περισσότερες μεγάλες ανεμογεννήτριες έχουν σωληνοειδείς χαλύβδινους πύργους που κατασκευάζονται σε τμήματα ύψους 20-30 μέτρων με φλάντζες σε κάθε άκρο και που ενώνονται όλα μαζί. Οι πύργοι έχουν σχήμα κώνου (δηλαδή με αύξηση της διαμέτρου τους προς τη βάση)

προκειμένου να αυξηθεί η αντοχή τους και για την εξοικονόμηση υλικών ταυτόχρονα. Στην εικόνα 2.8 απεικονίζονται πύργοι της κατηγορίας αυτής.



Εικόνα 2.8 : Σωληνοειδείς χαλύβδινοι πύργοι. [17]

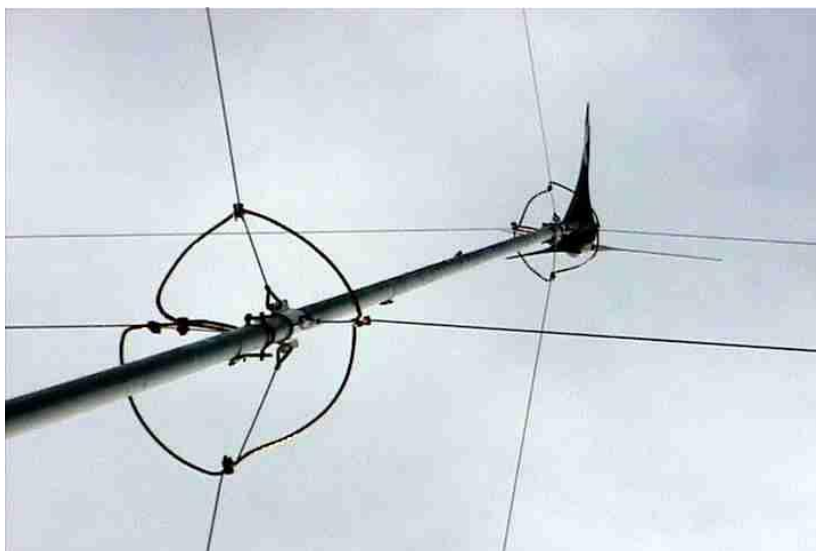
- *Πύργοι δικτυωτού πλέγματος:* Οι πύργοι αυτοί κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας συγκολλημένα κομμάτια χάλυβα. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι το κόστος, καθώς ένας πύργος δικτυωτού πλέγματος απαιτεί μόνο την μισή ποσότητα υλικών απ' ό,τι ένας σωληνοειδής πύργος με την ίδια ακαμψία. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι η εμφάνισή τους γι' αυτό για λόγους αισθητικής έχει σχεδόν καταργηθεί η χρήση τους για μεγάλες σύγχρονες ανεμογεννήτριες. Στην εικόνα 2.9 απεικονίζεται ένας πύργος της κατηγορίας αυτής.



Εικόνα 2.9 : Πύργος δικτυωτού πλέγματος. [18]

- *Καλωδιωτοί πύργοι:* Πολλές μικρές ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν στενούς πύργους που στηρίζονται με συρμάτινα καλώδια. Το πλεονέκτημά τους είναι η εξοικονόμηση βάρους, που συνεπάγεται μικρότερο κόστος κατασκευής. Το μειονέκτημά τους είναι η δύσκολη πρόσβαση γύρω τους, γεγονός που τους καθιστά λιγότερο κατάλληλους για αγροτικές περιοχές.

Στην εικόνα 2.10 απεικονίζεται ένας πύργος αυτής της κατηγορίας.



Εικόνα 2.10 : Καλωδιωτός πύργος [11]

2.4.3 Βάση [12]

Οι βάσεις των ανεμογεννητριών συνήθως κατασκευάζονται από σκυρόδεμα ενισχυμένο με χαλύβδινες μπάρες. Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι σχεδιασμού:

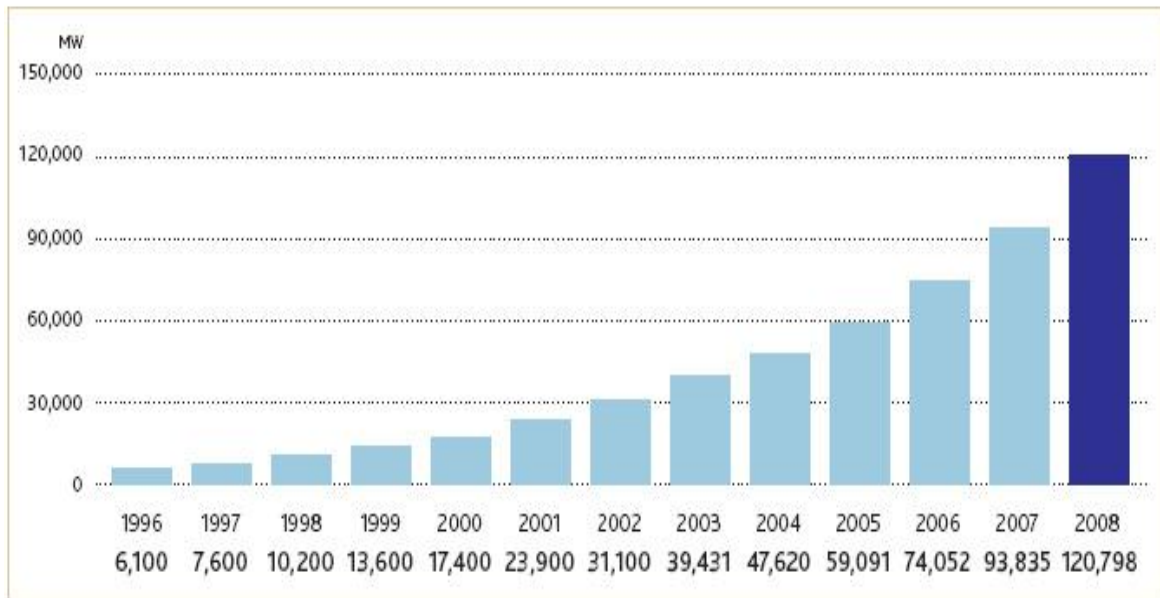
- Έχει την μορφή ενός ρηχού επίπεδου δίσκου με διάμετρο 12 περίπου μέτρα και 1 μέτρο πάχος.
- Έχει την μορφή ενός βαθύτερου κυλίνδρου με διάμετρο 4,5 περίπου μέτρα και 5 μέτρα βάθος.

Στο εσωτερικό της στεγάζονται οι μετρητές και τα καλώδια και κρατάει τον στρόβιλο ψηλά πάνω από το επίπεδο του εδάφους για την προστασία του περιβάλλοντος χώρου αλλά και των ανθρώπων από τα περιστρεφόμενα πτερύγια. Ακόμη η βάση ανυψώνει τον στρόβιλο πάνω από τα περιβάλλοντα εμπόδια που θα μπορούσαν σε διαφορετική περίπτωση να εμποδίζουν την ροή του ανέμου και να περιορίζουν έτσι την παραγόμενη ενέργεια.

2.5 Εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας διεθνώς [13]

Στην παράγραφο αυτήν παρουσιάζονται στοιχεία σχετικά με την εγκατεστημένη ισχύ αιολικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο, στην Ευρώπη αλλά και στην ελλαδικό χώρο. Στην εικόνα 2.11 βλέπουμε την παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας 1996-2008.

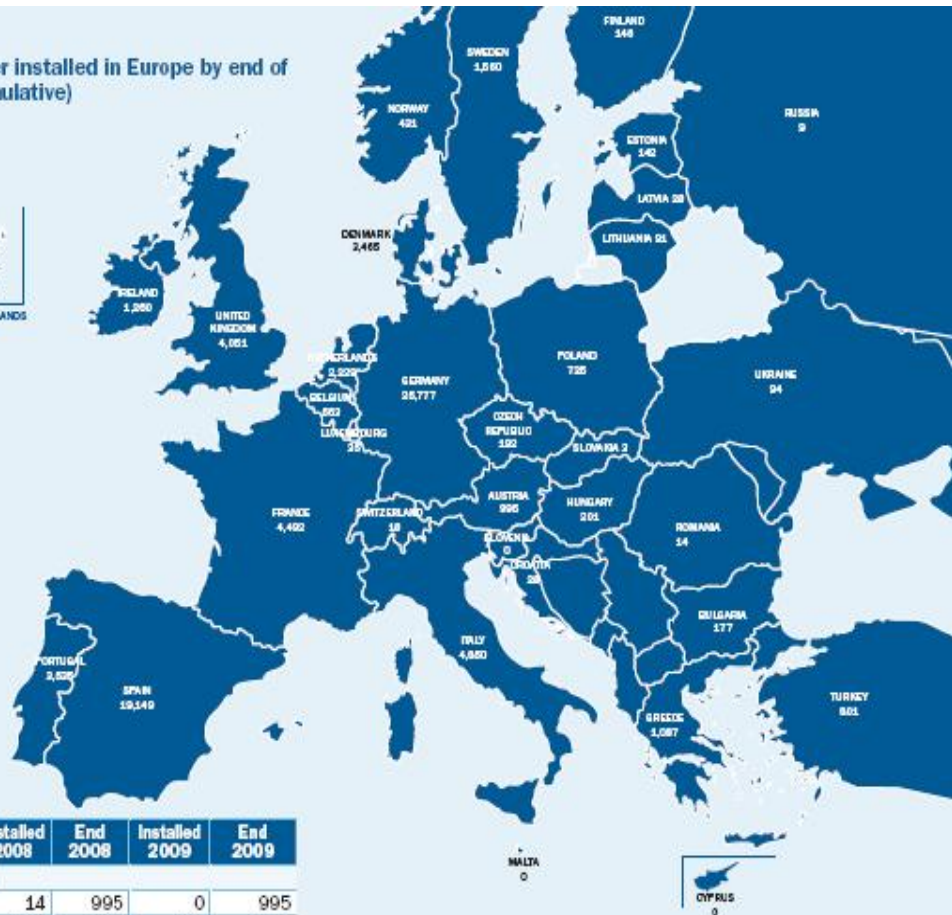
GLOBAL CUMULATIVE INSTALLED CAPACITY 1996-2008



Εικόνα 2.11 : Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας 1996-2008 [13]

Στην εικόνα 2.12 φαίνεται η εγκατεστημένη ισχύς στις ευρωπαϊκές χώρες στο τέλος του 2008, κατά την διάρκεια του 2009 και στο τέλος του ίδιου έτους. Παρατηρούμε ότι στα τέλη του 2008 η χώρα μας καταλάμβανε την 12η θέση ανάμεσα στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (αλλά και συνολικά) με 985 MW. Στην πρώτη θέση συναντάμε τη Γερμανία με 23.903 MW και διαφορά 7.0214 MW από την δεύτερη Ισπανία. Κατά την διάρκεια του 2009 εγκαταστάθηκαν στην Ελλάδα 102 MW γεγονός που την κατατάσσει στην 11η θέση της σχετικής λίστας των χωρών της Ε.Ε. Στο τέλος του 2009 με 1,087 MW εγκατεστημένης ισχύος.

Wind power installed in Europe by end of 2009 (cumulative)



	Installed 2008	End 2008	Installed 2009	End 2009
EU Capacity (MW)				
Austria	14	995	0	995
Belgium	135	415	149	563
Bulgaria	63	120	57	177
Cyprus	0	0	0	0
Czech Republic	34	150	44	192
Denmark	60	3,163	334	3,465
Estonia	19	78	64	142
Finland	33	143	4	146
France	950	3,404	1,088	4,492
Germany	1665	23,903	1,917	25,777
Greece	114	985	102	1,087
Hungary	62	127	74	201
Ireland	232	1,027	233	1,260
Italy	1010	3,736	1,114	4,850
Latvia	0	27	2	28
Lithuania	3	54	37	91
Luxembourg	0	35	0	35
Malta	0	0	0	0
Netherlands	500	2,225	39	2,229
Poland	268	544	181	725
Portugal	712	2,862	673	3,535
Romania	3	11	3	14
Slovakia	0	3	0	3
Slovenia	0	0	0	0
Spain	1558	16,689	2,459	19,149
Sweden	262	1,048	512	1,560
United Kingdom	569	2,974	1,077	4,051
Total EU-27	8,268	64,719	10,163	74,767
Total EU-15	7,815	63,604	9,702	73,194
Total EU-12	453	1,115	461	1,574
Of which offshore and near shore	374	1,479	582	2,061

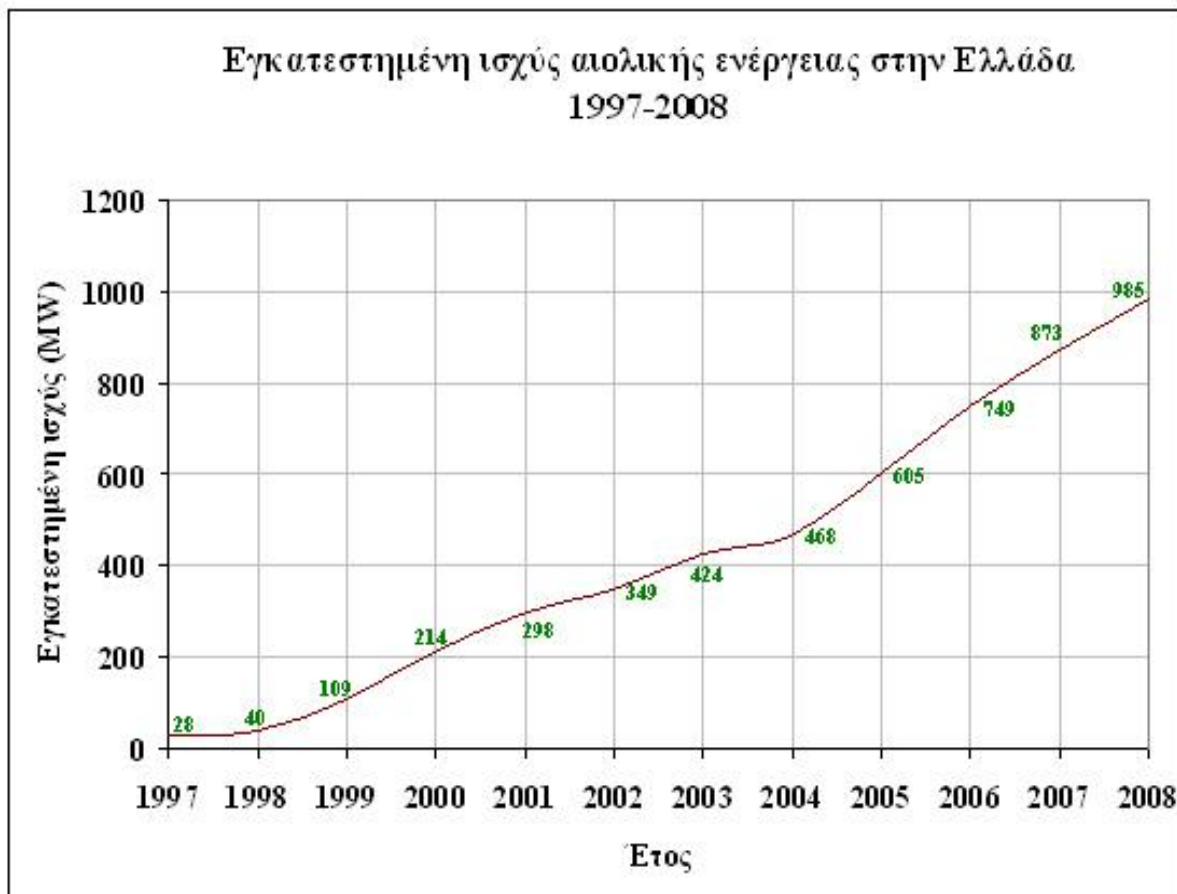
European Union: 74,767 MW
 Candidate Countries: 829 MW
 EFTA: 449 MW
 Total Europe: 76,152 MW

	Installed 2008	End 2008	Installed 2009	End 2009
Candidate Countries (MW)				
Croatia	1	18	10	28
FYROM*	0	0	0	0
Turkey	311	458	343	801
Total	312	476	353	829
EFTA (MW)				
Iceland	0	0	0	0
Liechtenstein	0	0	0	0
Norway	103	429	2	431
Switzerland	2	14	4	18
Total	105	443	6	449
Other (MW)				
Faroe Islands	0	4	0	4
Ukraine	1	90	4	94
Russia	0	9	0	9
Total	1	103	4	107
Total Europe	8,686	65,741	10,526	76,152

*FYROM = Former Yugoslav Republic of Macedonia
 Note: Due to previous-year adjustments, 114.77 MW of project de-commissioning, re-powering and rounding of figures, the total 2009 end-of-year cumulative capacity is not exactly equivalent to the sum of the 2008 end-of-year total plus the 2009 additions.

Εικόνα 2.12: Εγκατεστημένη ισχύς στην Ευρώπη. [14]

Στην εικόνα 2.13 παρουσιάζουμε την εγκατεστημένη ισχύ αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα 1997-2008.

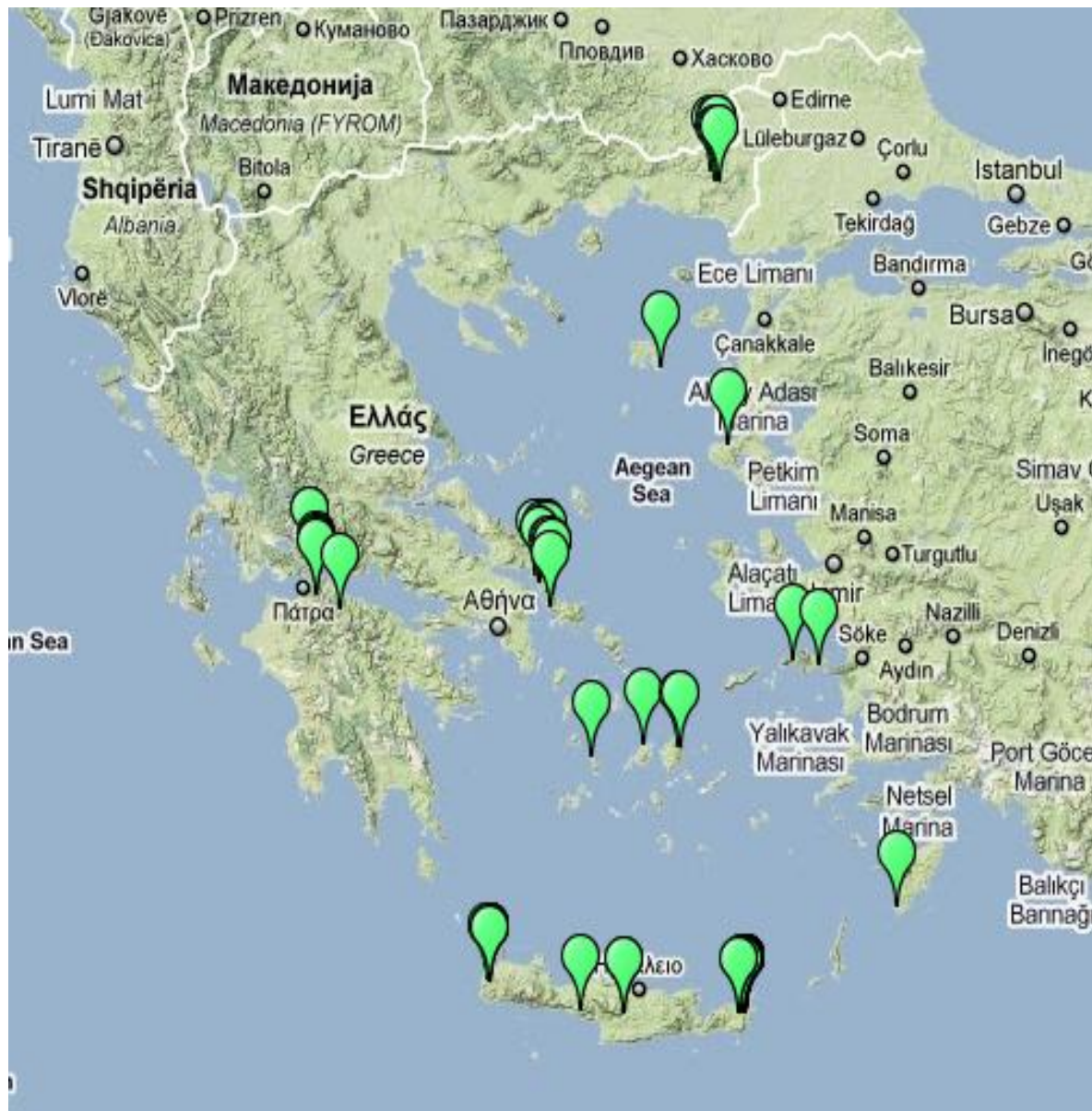


Εικόνα 2.13 : Εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα 1997- 2008. [13]

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

Ενέργειες για την ανάπτυξη της εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας έχουν γίνει σε ολόκληρη τη χώρα, ενώ στο γεγονός αυτό έχει συμβάλει και η πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τις ΑΠΕ, η οποία ενθαρρύνει και επιδοτεί επενδύσεις στις Ήπιες μορφές ενέργειας. Αλλά και σε εθνική κλίμακα, ο νέος αναπτυξιακός νόμος 3299/04, σε συνδυασμό με το νόμο για της ανανεώσιμες πηγές ενέργειας 3468/06, παρέχει ισχυρότατα κίνητρα ακόμα και για επενδύσεις μικρής κλίμακας. Η περιφέρεια

της Δυτικής Ελλάδας αν και έχει 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 δυο 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. Επιπλέον, σε διαδικασία αδειοδότησης βρίσκονται πέντε ακόμη μονάδες. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ανάγκες του νησιού σε ηλεκτρική ενέργεια και σε περίοδο αιχμής (Αύγουστος) ανέρχονται σε 50MW. Η αντιστοιχία μεταξύ της ισχύος που αποδίδει η Κεφαλονιά στο δίκτυο και της ισχύος που καταναλώνει είναι εξαιρετικά ενθαρρυντική για την εξάπλωση της αιολικής ενέργειας και σε πολλά ακόμη νησιά της επικράτειας. Συμφωνά με την ελληνική επιστημονική ένωση αιολικής ενέργειας παρουσιάζουμε τον παρακάτω χάρτη με τις εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες στον ελλαδικό χώρο (Εικόνα 2.14).



Εικόνα 2.14 : Περιοχές εγκατεστημένων ΑΓ στην Ελλάδα. [2]

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι η Ελλάδα κατέχει μια αξιοπρεπή θέση ανάμεσα στις χώρες της Ευρώπης. Ωστόσο οι τεράστιες διαφορές από κάποιες πιο προηγμένες χώρες αλλά και το πλούσιο αιολικό δυναμικό που διαθέτουμε, συνηγορούν στο ότι υπάρχουν δυνατότητες περαιτέρω ανάπτυξης. [14]

Αναφορές 2^{ου} κεφαλαίου :

1. Scientific American, Special Issue, "Energy for planet earth", September 1990.
2. Internet, www.eletaen.gr.
3. Internet, www.shadowfax.gr.
4. Internet, www.energy.gatech.edu.
5. Internet, <http://el.wikipedia.org/wiki>.
6. Γ. Μπεργελές "Ανεμοκινητήρες", Εκδόσεις Συμewών Ο.Ε., 1994
7. Internet, www.daviddarling.info.
8. Internet, www.nacelleparts.com .
9. Dušan Medved, "WIND TURBINE DESIGN"
10. Internet, www.talentfactory.dk
11. Internet, www.tdsiam.com
12. Internet, www.ecw.org
13. Internet, www.eunice-group.com
14. Internet, www.ewea.org.
15. Internet, <http://www.alternative-energy-news.info/technology/wind-power/wind-turbines/>
16. Internet, http://www.energyeducation.tx.gov/renewables/section_4/topics/windmills_or_turbines/d.html
17. Internet, <http://www.windpowerninja.com/wind-power-news/maine-wind-energy-farm-opens/>
18. Internet, <http://www.alibaba.com/manufacturers/lattice-tower-manufacturer.html>

3. Ο ΚΕΡΑΥΝΟΣ ΚΑΙ ΟΠΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΣΤΙΣ ΑΓ

Ο κεραυνός είναι ένα φαινόμενο που προκαλεί σοβαρές βλάβες στις ανεμογεννήτριες. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά του κεραυνού και, στη συνέχεια, αναλύονται οι επιπτώσεις του κεραυνικού πλήγματος στις ανεμογεννήτριες.

3.1 Στοιχεία και χαρακτηριστικά κεραυνών [1],[2]

Η κεραυνική εκκένωση μπορεί να οριστεί ως μια μορφή ηλεκτρικής διάσπασης, χαρακτηριζόμενη από υψηλό ρεύμα, που συμβαίνει σε πολύ μεγάλα διάκενα. Ο κεραυνός εμφανίζεται όταν κάποια περιοχή της ατμόσφαιρας επιτυγχάνει μια ηλεκτρική φόρτιση αρκετά μεγάλη, έτσι ώστε τα ηλεκτρικά πεδία που συνδέονται με τη φόρτιση να προκαλούν την ηλεκτρική διάσπαση του αέρα.



Εικόνα 3.1: Κεραυνός [9]

Ο κεραυνός αποτελείται από ένα οπτικό φαινόμενο, την αστραπή (Εικόνα 3.1), που οφείλεται στην πυράκτωση των μορίων του αέρα, και από το καθαρά ηλεκτρικό φαινόμενο, δηλαδή τη ροή των ηλεκτρικών φορτίων, που συνοδεύεται από τη βροντή, εξαιτίας της απότομης εκτόνωσης των αερίων της περιοχής.

3.1.1 Διαχωρισμός των ηλεκτρικών φορτίων στα νέφη [1],[2]

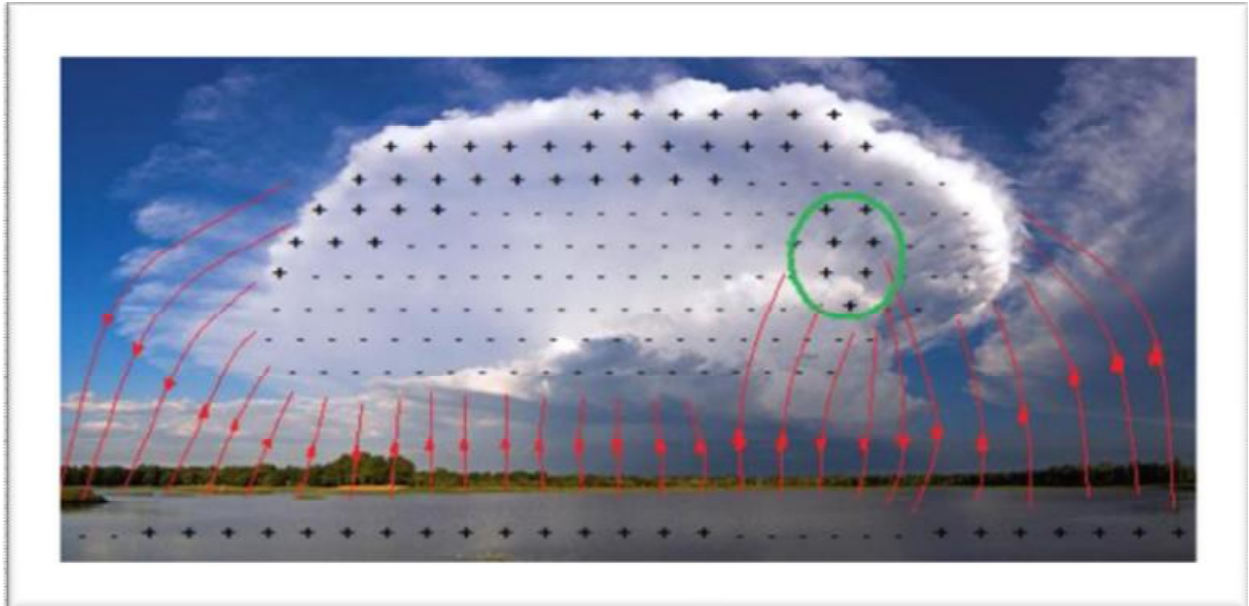
Έως σήμερα δεν υπάρχει συμφωνία αναφορικά με το μηχανισμό ηλέκτρισης ενός νέφους καταιγίδας. Υπάρχουν τουλάχιστον δύο διαφορετικές θεωρίες: εκείνη που βασίζεται στην φόρτιση σταγονιδίων του νέφους, που συμβαίνει μόλις αρχίσει η πτώση τους προς τη γη και σε εκείνη που βασίζεται στη μεταφορά φορτίων σε ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας με ανοδικά ρεύματα που οφείλονται σε θερμοκρασιακές διαφορές [1].

Τρία φαινόμενα τα οποία μπορεί να υποτεθεί ότι παίζουν κάποιο ρόλο κατά το διαχωρισμό των ηλεκτρικών φορτίων είναι το φαινόμενο της διασποράς, το φαινόμενο της ισχυρής ψύξεως και το φαινόμενο της διαρρήξεως [2]. Σύμφωνα με τα φαινόμενα αυτά και συνοψίζοντας τα πειραματικά επιβεβαιωμένα χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρισμένου νέφους μπορούν να εξαχθούν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

α) Ένα ηλεκτρισμένο σύννεφο περιέχει ηλεκτρικά φορτία και των δύο πρόσημων σε ίσες ποσότητες που καταλαμβάνουν διακεκριμένες περιοχές του νέφους. Δηλαδή η φόρτιση ενός νέφους δεν είναι τίποτα άλλο παρά ένας διαχωρισμός φορτίων. Τα σύννεφα παρουσιάζουν κατά κανόνα στο κάτω μέρος τους ένα σημαντικό φορτίο αρνητικής πολικότητας, που κυμαίνεται από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες Cb και στο πάνω μέρος τους ένα φορτίο θετικής πολικότητας. Έτσι, στο χώρο μεταξύ σύννεφου και γης αναπτύσσεται ένα ηλεκτρικό πεδίο, του οποίου οι δυναμικές γραμμές καταλήγουν στη γη πάνω σε επαγόμενα φορτία, αντίθετης πολικότητας από αυτή που έχουν τα φορτία του σύννεφου (Εικόνα 3.2).

β) Η πυκνότητα και η διασπορά των φορτίων και των πρόσημων δημιουργούν μια συγκεχυμένη εικόνα μέσα στο σύννεφο, που διαρκώς μεταβάλλεται, γεγονός που εμποδίζει τη συστηματική ταξινόμηση των ηλεκτρικών καταστάσεων που μπορούν να επικρατούν μέσα σ' ένα ηλεκτρισμένο σύννεφο.

γ) Ο διαχωρισμός των φορτίων μέσα στο σύννεφο συμβαίνει μέσα σε μικρό σχετικά χρονικό διάστημα (από μερικά πρώτα λεπτά της ώρας ως μισή ώρα περίπου).



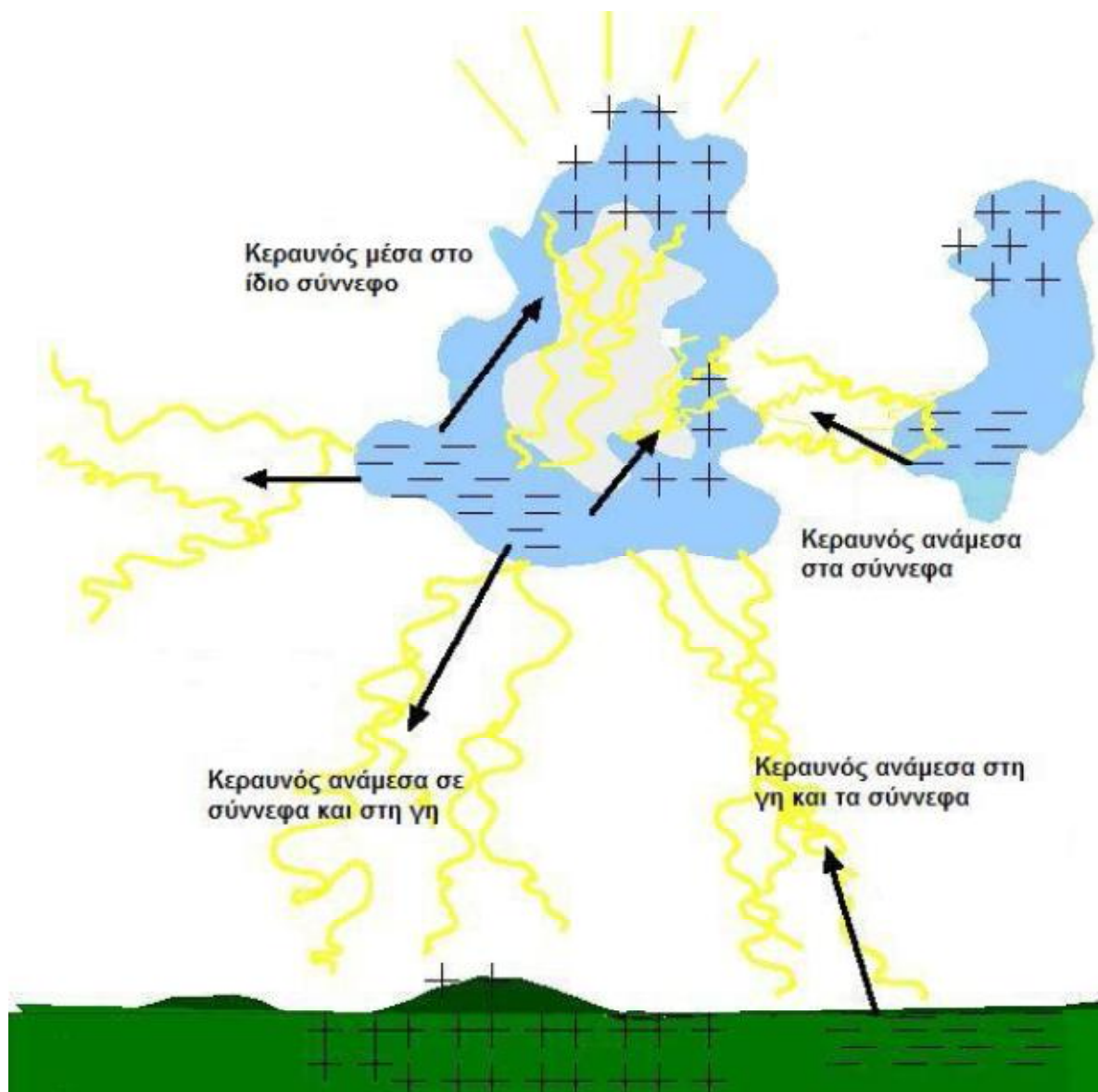
Εικόνα 3.2: Κατανομή του φορτίου εντός του νέφους και ηλεκτρικό πεδίο νέφους-γης.[10]

3.1.2 Κατηγορίες κεραυνικών εκκενώσεων [1],[2]

Οι ατμοσφαιρικές εκκενώσεις διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες (Εικόνα 3.3).

α) Μεταξύ σύννεφου και γης ή και αντίστροφα (Εικόνα 3.4).

Οι κεραυνοί αυτοί παρατηρούνται όταν το ηλεκτρικό πεδίο πάρει την κρίσιμη τιμή πλησίον του νέφους, οπότε έχουμε εκκένωση κατερχόμενη, ή πλησίον της γης, οπότε έχουμε εκκένωση ανερχόμενη. Σαν πολικότητα της εκκένωσης μεταξύ σύννεφου και γης λαμβάνεται εκείνη του φορτίου του κάτω μέρους του νέφους, που την προκάλεσε. Οι κεραυνοί μεταξύ νέφους και γης είναι η πιο καταστροφική και παράλληλα επικίνδυνη μορφή κεραυνού. Αν και δεν είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος, είναι αυτός ο οποίος κατανοείται καλύτερα. Οι περισσότεροι κεραυνοί εκδηλώνονται κοντά στην αρνητική περιοχή του νέφους. Όμως, μια σημαντική μειονότητα από κεραυνούς μεταφέρει θετικό φορτίο στην γη. Αυτοί οι θετικοί κεραυνοί συχνά συμβαίνουν κατά την διάρκεια της καταιγίδας. Οι θετικοί κεραυνοί είναι επίσης περισσότερο γνωστοί σαν ποσοστό προσκρούσεων στο έδαφος κατά την διάρκεια των χειμερινών μηνών.



Εικόνα 3.3: Τα είδη των κεραυνών και η κατανομή του φορτίου στα νέφη κατά την διάρκεια μιας καταιγίδας.[11]



Εικόνα 3.4: Κεραυνός μεταξύ σύννεφου και γης [12]

β) Κεραυνοί μέσα στα σύννεφα (Εικόνα 3.5).



Εικόνα 3.5:Κεραυνός μέσα στα σύννεφα [13]

Οι κεραυνοί μέσα στα νέφη είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος εκφορτίσεως. Στην περίπτωση αυτή, η εκκένωση λαμβάνει χώρα ανάμεσα στο ανώτερο θετικό και κατώτερο αρνητικό κέντρο του χωρικού φορτίου. Η διάρκεια της εκκένωσης είναι μεγάλη και το ρεύμα της έχει τιμές από μερικές εκατοντάδες έως 1000 Amperes. Η διαδικασία συμβαίνει μέσα στο νέφος και έξω από το νέφος φαίνεται σαν διαχέουσα λαμπρότητα που τρεμοσβήνει.

γ) Κεραυνοί ανάμεσα στα σύννεφα (Εικόνα 3.6).

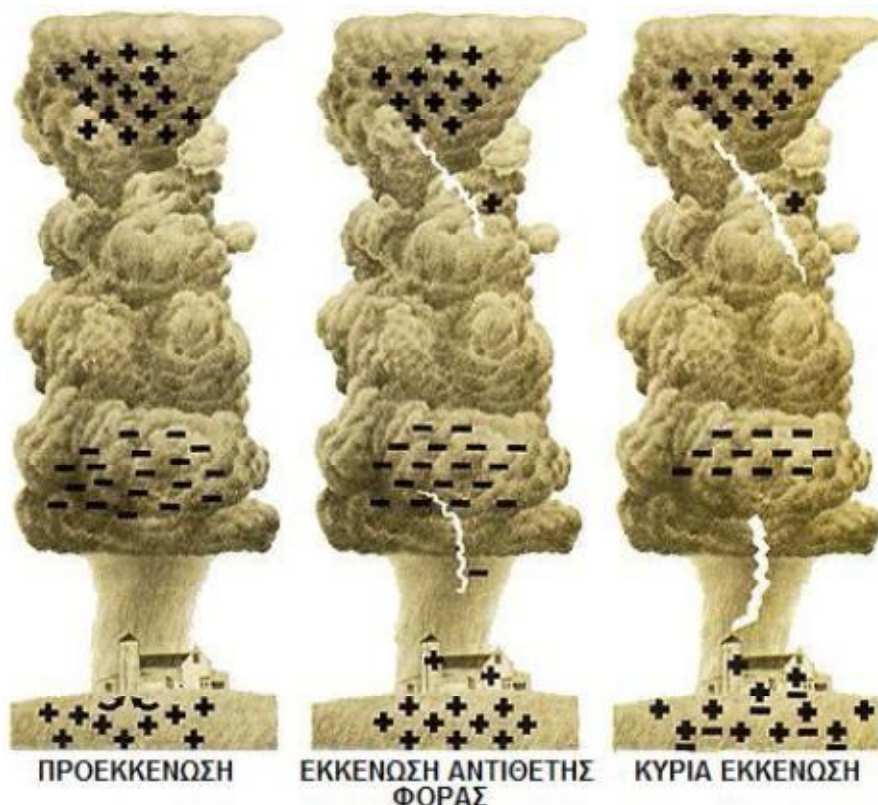


Εικόνα 3.6: Κεραυνός ανάμεσα στα σύννεφα [14]

Κεραυνοί αυτού του τύπου εκδηλώνονται σε ύψος μεγαλύτερο του 1 km και μικρότερο των 12 km. Οι κεραυνοί αυτοί έχουν μεγάλο μήκος κεραυνικού τόξου, έως και 40 km.

3.1.3. Φάσεις κεραυνικών εκκενώσεων [1]

Κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας διακρίνουμε τις τρεις ακόλουθες φάσεις κεραυνικής εκκένωσης (Εικόνα 3.7)



Εικόνα 3.7: Οι τρεις φάσεις κεραυνικής εκκένωσης κατά την διάρκεια μιας καταιγίδας.[1]

α) Προεκκένωση:

Το ηλεκτρισμένο νέφος λίγο πριν από μια κεραυνική εκκένωση εμφανίζεται μακροσκοπικά σαν ένα ηλεκτρικό δίπολο, εξαιτίας του οποίου επάγονται στο έδαφος πεδία με ένταση πάνω από 5kV/m . Στις παρυφές περιοχών του νέφους με μεγάλη πυκνότητα φορτίου, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να πάρει αρκετά μεγάλες τιμές. Οι υψηλές αυτές εντάσεις, συνδυαζόμενες με τη μικρή πυκνότητα του αέρα και μερικούς άλλους παράγοντες που προκαλούν πρόσθετη τοπική ενίσχυση του ηλεκτρικού πεδίου, μπορούν να προκαλέσουν έναρξη ιονισμού των μορίων του αέρα από κρούσεις ηλεκτρονίων. Ο ιονισμός αυτός αποτελεί το πρώτο βήμα για την έναρξη μιας ηλεκτρικής εκκένωσης. Το επόμενο βήμα είναι ο σχηματισμός ενός οχετού, ο οποίος ακολουθεί τις δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου. Ο οχετός ακολουθεί την κατεύθυνση που θα προκαλέσει την ηλεκτρική σύνδεση και αλληλοεξουδετέρωση των δύο ετερόσημων φορτίων. Αν οι γραμμές μεγίστης πεδιακής έντασης κατευθύνονται προς το έδαφος, ο οχετός θα κατευθυνθεί προς αυτό.

Η προεκκένωση ξεκινάει από κάποια περιοχή του σύννεφου όπου το ηλεκτρικό πεδίο θα αποκτήσει πολύ μεγάλες τιμές, της τάξεως των μερικών εκατοντάδων V/m. Δημιουργείται έτσι ένας αγώγιμος δρόμος (οχετός), ο οποίος τροφοδοτείται συνέχεια με φορείς ηλεκτρικού φορτίου από το σύννεφο. Έχουμε, κατά συνέπεια, τη δημιουργία υψηλού ηλεκτρικού πεδίου που σε μια διαδικασία ανακύκλωσης συμβάλλει στην προώθησή του προς τη γη. Έτσι, η προεκκένωση, αφού ξεκινήσει, αναπτύσσεται από μόνη της στο χώρο του ηλεκτρικού πεδίου, εφόσον τροφοδοτείται από την πλευρά του σύννεφου με μεγάλη ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου. (Ενδέχεται να υπάρχουν και διακλαδώσεις του αγώγιμου οχετού, οι οποίες, όμως, δε απολήγουν σε γεφύρωσή του προς τη γη, λόγω του ότι δεν υπάρχει διαθεσιμότητα μεγάλου αριθμού ηλεκτρικών φορέων).

β) Εκκένωση αντίθετης φοράς:

Η διαμήκης πτώση τάσεως κατά μήκος του οχετού προεκκένωσης διαφέρει στις διάφορες θέσεις του. Έτσι, ο οχετός προεκκένωσης εμφανίζεται σαν μια μεταλλική προεξοχή που επεκτείνεται από το σύννεφο προς το έδαφος. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τον οχετό προεκκένωσης και ιδίως στο άκρο του προς το έδαφος, είναι πολύ μεγάλη και υπερβαίνει κατά πολύ την πεδιακή ένταση που απαιτείται για τον ιονισμό του αέρα από κρούσεις (γύρω στα 30kV/cm). Για αυτό το λόγο, ο οχετός περιβάλλεται διαρκώς από ένα μανδύα Corona (στεμματοειδούς εκκενώσεως), που εκτείνεται μερικά μέτρα γύρω από αυτόν. Το πάχος του μανδύα αυτού είναι μεγαλύτερο στο προς το έδαφος άκρο του οχετού και αυξάνει όσο η κεφαλή του οχετού πλησιάζει προς το έδαφος. Καθώς τώρα ο οχετός κατέρχεται στη γη, αυξάνει το ηλεκτρικό πεδίο της γης. Έτσι, είναι δυνατό να δημιουργήσει ένα φαινόμενο τύπου Corona, το οποίο καταλήγει σε μια ανερχόμενη εκκένωση, η οποία τείνει να συναντήσει τον κατερχόμενο οχετό, οπότε και έχουμε πλήρη γεφύρωση του διακένου αέρα, δηλαδή κεραυνικό πλήγμα. Η απόσταση που θα πρέπει να φτάσει η κεφαλή του κατερχόμενου οχετού για να ξεκινήσει από τη γη η εκκένωση αντίθετης φοράς χαρακτηρίζεται σαν απόσταση εναύσεως.

γ) Κύρια εκκένωση:

Στην τελευταία αυτή φάση, η οποία εξελίσσεται με ιδιαίτερα μεγάλη ταχύτητα, έχουμε γεφύρωση της αποστάσεως μεταξύ νέφους και γης. Ήδη προϋπάρχει αγώγιμος οχετός προεκκενώσεως που παίρνει τη μορφή ενός πλήρους οχετού εκκενώσεως.

Τα κυκλοφορούντα ρεύματα δια μέσου του οχετού είναι της τάξεως των 10-100kA, με κλίσεις μετώπου της τάξεως των 20-100kA/μs, ενώ η διάρκεια ροής των ρευμάτων αυτών είναι της τάξεως των μερικών δεκάδων μs. Το μήκος του κεραυνικού οχετού εξαρτάται από το ύψος που βρίσκεται το αντίστοιχο καταιγιδοφόρο νέφος, ενώ όταν πρόκειται για κεραυνό που λαμβάνει χώρα μεταξύ δύο νεφών, εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των αντιστοιχών νεφών. Σε περίπτωση που έχουμε κεραυνοπληξία προς γη, το μήκος των κεραυνικών οχετών είναι της τάξεως λίγων χιλιομέτρων το πολύ. Η διάμετρος ενός οχετού εκκενώσεως είναι της τάξης των μερικών εκατοστών, γιατί από μόνο του το πλάσμα, λόγω του μαγνητικού πεδίου, αποσυμπιέζεται. Η μεγάλη λαμπρότητα του ηλεκτρικού τόξου εξηγεί και το γεγονός ότι ο κεραυνικός οχετός συχνά οδηγεί σε παροδικές θαμβώσεις.

3.1.4. Πολικότητα κεραυνικών εκκενώσεων [1]

Σαν πολικότητα εκκενώσεως λαμβάνεται η πολικότητα φορτίου του κάτω μέρους του σύννεφου που προκάλεσε την εκκένωση. Οι ατμοσφαιρικές εκκενώσεις μπορούν να διακριθούν αναλόγως της πολικότητάς των σε:

α) Θετικές εκκενώσεις, που αποτελούνται από μία μόνο εκφόρτιση διάρκειας από 0.1 έως 2 ms. Η διάρκεια μετώπου αυτών κυμαίνεται μεταξύ 20 και 50 ms, το δε εύρος του ρεύματος εκφορτίσεως που αντιπροσωπεύουν μπορεί να υπερβεί τα 100 kA, ενώ η μέση κλίση μετώπου είναι 2 kA/μs.

β) Αρνητικές εκκενώσεις, που αποτελούνται συνήθως από τρεις ή και περισσότερες διαδοχικές εκφορτίσεις. Η διάρκεια όλου του φαινομένου, κυμαίνεται μεταξύ 0.2 και 1 ms. Η διάρκεια μετώπου και το εύρος της πρώτης εκφορτίσεως είναι μικρότερα σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μεγέθη για θετικές εκκενώσεις (διάρκεια μετώπου 10 έως 15 μs). Για τις μετά την πρώτη εκφορτίσεις το μεν εύρος είναι λίγο μικρότερο από αυτό της πρώτης, η δε διάρκεια μετώπου είναι σημαντικά μικρότερη κυμαινόμενη μεταξύ 0.5 και 1 μs. Η κλίση μετώπου για την πρώτη εκφόρτιση υπερβαίνει τα 20 kA/μs, ενώ για τις επόμενες είναι πολύ μεγαλύτερη (τάξεως 40 kA/μs).

Στον ελλαδικό χώρο, όπου το κλίμα είναι εύκρατο, το 80 έως 90% των ατμοσφαιρικών εκκενώσεων είναι αρνητικές. Οι ατμοσφαιρικές εκκενώσεις, ανάλογα με την πορεία της προεκκενώσεως διακρίνονται σε:

α) Ανερχόμενες, όταν η προεκκένωση αρχίζει από το έδαφος και κατευθύνεται προς το νέφος και

β) Κατερχόμενες, όταν η προεκκένωση αρχίζει από το νέφος.

Σε μέρη επίπεδα, χωρίς ιδιαίτερες προεξοχές, πλειοψηφούν οι κατερχόμενες εκκενώσεις. Αντίθετα ανερχόμενες εκκενώσεις δημιουργούνται εκεί που υπάρχουν υψηλά και αιχμηρά αντικείμενα (π.χ. ένας πυλώνας στην κορυφή ενός βουνού).

3.1.5. Παράγοντες που επηρεάζουν τον κεραυνό [3]

Σε μια περιοχή με εύκρατο κλίμα τα χαρακτηριστικά του κεραυνού επηρεάζονται από την ορογραφική κατάσταση της περιοχής. Στις ορεινές περιοχές, η ένταση του ρεύματος του κεραυνού, όπως και το σχετικό φορτίο, είναι μικρά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μικρή απόσταση γης - νέφους προκαλεί εκκενώσεις στη γη πριν ολοκληρωθεί η διαδικασία φορτίσεως του νέφους και στο ότι το μικρό σχετικά μήκος του αγωγού του κεραυνού έχει σαν επακόλουθο τη συσσώρευση ενός μικρού μόνο φορτίου κατά μήκος αυτού.

Ο αριθμός των εκκενώσεων στις ορεινές περιοχές είναι πάντοτε μεγαλύτερος από εκείνο στις πεδινές. Στις πεδινές περιοχές, όπου η απόσταση νέφους - γης είναι μεγαλύτερη σημειώνονται λιγότερες εκκενώσεις, αλλά με υψηλή ένταση ρεύματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σχετικά σπάνια το ηλεκτρικό πεδίο είναι τέτοιο, ώστε να επιτρέπει κεραυνό νέφους - γης. Η μεγάλη ένταση ρεύματος οφείλεται στην παρουσία νεφών πολύ φορτισμένων και οχετών εκκενώσεως μεγάλου μήκους.

Επίσης, σημαντικό ρόλο στη δημιουργία κεραυνικών εκκενώσεων παίζει και η εποχή. Το καλοκαίρι λόγω σημαντικού ύψους των νεφών από το έδαφος πολλές εκκενώσεις πραγματοποιούνται εντός ενός νέφους ή μεταξύ νεφών. Αυτό έχει σαν συνέπεια μία απότομη μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του εδάφους.

3.1.6. Παράμετροι κεραυνού [4]

Μια κεραυνική εκκένωση χαρακτηρίζεται από δύο κατηγορίες παραμέτρων: η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει παραμέτρους σχετικές με την ιδιοσυστασία της εκκένωσης, τη διάρκεια των ρευμάτων και τα διαστήματα όπου το ρεύμα είναι μηδενικό κατά την

εκδήλωση πολλαπλών εκκενώσεων. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει παραμέτρους σχετιζόμενες με τα κεραυνικά ρεύματα, των οποίων η διάρκεια είναι μικρότερη από λίγα ms. Οι σημαντικότερες παράμετροι είναι οι ακόλουθες:

α) Η μέγιστη τιμή ρεύματος, η οποία προκαλεί υπερπήδηση μονωτήρων και καταστροφή των μονωτικών υλικών, εξαιτίας της ανύψωσης του δυναμικού του πληγέντος σημείου.

β) Η μέγιστη κλίση μετώπου του ρεύματος $\left(\frac{di}{dt}\right)_{\max}$, η οποία καθορίζει τις επαγόμενες τάσεις σε βρόγχους κυκλωμάτων και τάσεις που αναπτύσσονται σε λογικά κυκλώματα ή κυκλώματα που περιλαμβάνουν ευαίσθητα ηλεκτρικά στοιχεία του συστήματος πλοήγησης ή τηλεπικοινωνίας αεροσκαφών.

γ) Το μεταφερόμενο φορτίο $\int_0^{\infty} i(t)dt$, το οποίο ευθύνεται για την τοπική τήξη και τη διάτρηση μεταλλικών επιφανειών μικρού πάχους.

δ) Το ολοκλήρωμα του τετραγώνου του ρεύματος $\int_0^{\infty} i^2(t)dt$, ποσότητα ανάλογη της εκλυόμενης από το κεραυνικό πλήγμα ενέργειας, η οποία μπορεί να προκαλέσει θερμικά φαινόμενα (τήξη μετάλλων, έναυση εύφλεκτων ατμών ή αερίων).

3.1.7. Κεραυνική στάθμη – Ισοκεραυνικές καμπύλες [7]

Κεραυνική στάθμη συγκεκριμένου τόπου ονομάζεται το πλήθος των ημερών καταιγίδας που αντιστοιχούν στο συγκεκριμένο τόπο σε ένα χρόνο, ενώ ως μέρα καταιγίδας χαρακτηρίζεται εκείνη κατά τη διάρκεια της οποίας ακούγεται μία τουλάχιστον βροντή. Ισοκεραυνική καμπύλη ονομάζεται ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που έχουν την ίδια κεραυνική στάθμη.

Από την κεραυνική στάθμη υπολογίζεται η πυκνότητα των κεραυνών ανά έτος και km² που πέφτουν στο έδαφος σε ένα συγκεκριμένο τόπο. Υπάρχουν πολλές μελέτες και μετρήσεις για την μέτρηση της πυκνότητας των κεραυνών, με σημαντικότερη αυτή του A.J.Eriksson που πρότεινε την ακόλουθη εξίσωση:

$$Ng = 0.04 * Td^{1.25}$$

όπου Ng είναι η πυκνότητα των κεραυνών ανά km² και Td είναι οι ημέρες καταιγίδας.

3.2 Επιπτώσεις από πλήγματα κεραυνών [5],[6]

Πολλές φορές παρατηρούνται επικίνδυνες επιπτώσεις σε μια κατασκευή και στο περιεχόμενό της ως αποτέλεσμα άμεσου ή έμμεσου πλήγματος κεραυνού. Ως άμεσο πλήγμα θεωρείται η περίπτωση κατά την οποία ο κεραυνός πλήττει κατευθείαν την κατασκευή ή το συλλεκτήριο Σύστημα Αντικεραυνικής Προστασίας της. Το έμμεσο πλήγμα κεραυνού σε μια κατασκευή αναφέρεται στην περίπτωση που ο κεραυνός πλήττει την κοντινή περιοχή της (έδαφος ή γεινιάζουσα κατασκευή) ή τις εισερχόμενες παροχές υπηρεσιών κοινής ωφέλειας.

3.2.1 Επιπτώσεις στον άνθρωπο [6]

Ο άνθρωπος υπόκειται σε κίνδυνο από την πτώση του κεραυνού. Μπορεί όχι μόνο να προκληθεί σημαντική βλάβη αλλά και απώλεια της ανθρώπινης ζωής μέσω διαφορετικών μηχανισμών όπως

- άμεσο πλήγμα
- άμεση επαφή, όταν το ανθρώπινο σώμα βρίσκεται σε επαφή με κάποιο αντικείμενο που πλήττεται από κεραυνό
- υπερπήδηση, όταν το ανθρώπινο σώμα διοχετεύει παράλληλα τμήμα της εκκένωσης προς την γη ως αποτέλεσμα της ηλεκτρικής διάσπασης του διακένου αέρα που παρεμβάλλεται
- βηματική τάση, το ανθρώπινο σώμα υπόκειται σε υψηλή τάση λόγω της εμφάνισης διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στα πόδια η οποία οφείλεται στην ακτινική διάχυση του ρεύματος του κεραυνού στο έδαφος
- επιφανειακή διάσπαση του εδάφους, το ανθρώπινο σώμα ευρισκόμενο κοντά στο σημείο πλήγματος αποτελεί τμήμα της διαδρομής του ηλεκτρικού τόξου της επιφανειακής διάσπασης του εδάφους.
- τυφλό τραύμα, το ανθρώπινο σώμα εκτινάσσεται σε απόσταση είτε λόγω έντονων μυϊκών συσπάσεων (οπισθοτονική σύσπαση) είτε λόγω του κρουστικού κύματος πίεσης που συνοδεύει την εκκένωση.

3.2.2 Επιπτώσεις σε κατασκευές [5]

Οι επιπτώσεις του πλήγματος του κεραυνού σε μια κατασκευή οφείλονται είτε στο ίδιο το ηλεκτρικό τόξο της εκκένωσης είτε σε δευτερογενή φαινόμενα που παρατηρούνται κατά την διάρκεια της εκκένωσης. Ανάλογα με τα φαινόμενα και τις επιπτώσεις που παρατηρούνται οι επιδράσεις του κεραυνού σε μια κατασκευή μπορεί να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες:

- θερμικές επιδράσεις
- μηχανικές επιδράσεις
- ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις

Συνοπτικά παρουσιάζονται παρακάτω οι διάφορες επιπτώσεις σε σχέση με τις παραμέτρους του κεραυνού.

Παράμετρος	Επιδράσεις
Μέγιστο ρεύμα (peak current)	Θερμικές, Μηχανικές, Ηλεκτρομαγνητικές
Ειδική ενέργεια (Joules/ Ω)	Θερμικές, Μηχανικές
Κλίση ρεύματος (A/s)	Επαγόμενες τάσεις στην ηλεκτρική καλωδίωση και σε βρόγχους λόγω μαγνητικής ροής, Αγωγιμες ζεύξεις,
Φορτίο (C)	Μαγνητικές ζεύξεις Φθορές στο σημείο προσκόλλησης του τόξου, φθορές σε σημεία της διαδρομής του τόξου

Πίνακας 3.1: Επιπτώσεις κεραυνού [5]

3.2.2.1 Επιπτώσεις από την τιμή κορυφής του ρεύματος του κεραυνού (lighting peak current) καθώς και από την ειδική ενέργεια [5]

Η διέλευση του ρεύματος του κεραυνού από έναν αγωγό προκαλεί θερμικές επιδράσεις καθώς επίσης και μαγνητικές δυνάμεις στον αγωγό. Τα δύο αυτά φαινόμενα είναι εξαρτώμενα από την ειδική ενέργεια του ρεύματος του κεραυνού. Η θερμική ενέργεια κατά την διέλευση του κεραυνικού ρεύματος δια μέσου ενός αγωγού ωμικής αντίστασης R θα δίνεται από τη σχέση:

$$W=R\int i^2 dt \text{ σε Joule}$$

Η παράμετρος $\int i^2 dt$ είναι η ειδική ενέργεια (specific energy ή SE) του ρεύματος του κεραυνού με μονάδες όπως ειπώθηκε σε Joule/Ω. [4] Κατά τη διέλευση του ρεύματος του κεραυνού από έναν αγωγό παρατηρείται ανύψωση της θερμοκρασίας ως απόρροια της θερμικής ενέργειας. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει η διατομή του αγωγού αυτού να είναι τέτοια ώστε να μπορεί να μεταφέρεται με ασφάλεια το ρεύμα του κεραυνού και να μην ξεπερνιέται η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία αντοχής του αγωγού.

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται η ελάχιστη διατομή αγωγών για διάφορες τιμές της ειδικής ενέργειας έτσι ώστε να μεταφέρεται με ασφάλεια το ρεύμα του κεραυνού.

	Χαλκός			Αλουμίνιο			Χάλυβας		
SE ($\times 10^7$) [J/Ω]	1	0,56	0,25	1	0,56	0,25	1	0,56	0,25
S[mm ²]	21	15	10	35	26	18	58	43	29

Πίνακας 3.2: Ελάχιστη διατομή αγωγών [6]

Ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις / Μηχανικές επιδράσεις [6]

Οι μηχανικές επιδράσεις σχετίζονται με την μέγιστη τιμή του ρεύματος του κεραυνού και την ειδική του ενέργεια. Παρατηρούνται μηχανικές καταπονήσεις όπως παραμορφώσεις ή μετακινήσεις των υλικών της κατασκευής ή και αποκόλληση στρωμάτων στρωματομόρφων υλικών ως αποτέλεσμα των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά τη διέλευση του ρεύματος του κεραυνού. Μαγνητικές δυνάμεις παρατηρούνται σε παράλληλους αγωγούς που διαρρέονται από ρεύμα. Αγωγοί που διαρρέονται από ρεύματα ίδιας φοράς έλκονται μεταξύ τους ενώ αγωγοί που διαρρέονται από ρεύματα αντίθετης φοράς απωθούνται. Κατά την διέλευση του ρεύματος του κεραυνού μέσω ενός απομονωμένου αγωγού με οξείες αλλαγές στην όδυσή του αναπτύσσονται δυνάμεις οι οποίες τείνουν να τον ισιώσουν. Οι δυνάμεις αυτές μπορεί να οδηγήσουν και σε μετατόπιση του αγωγού λόγω χαλάρωσης των στηριγμάτων του ή και στην κάμψη του.

Θραύσεις σε υλικά, διάτρηση, ρήγματα, αποκολλήσεις υλικών, αναφλέξεις [6]

Σε επιφάνειες ενώσεων ινών άνθρακα η θερμική ενέργεια καθώς και η θερμότητα που αναπτύσσεται στο σημείο πλήγματος αποκτούν ιδιαίτερα υψηλές τιμές λόγω των 14 μεγάλων τιμών της ειδικής αντίστασης του υλικού και της τάσης του τόξου. Διάτρηση ή ανάφλεξη μπορεί να παρατηρηθεί και σε μονωτικά υλικά λόγω της πολύ υψηλής θερμοκρασίας και της απότομης μεταβολής της. Σε υλικά που περιέχουν ίχνη υγρασίας οι θερμικές επιδράσεις του κεραυνού εκδηλώνονται υπό την μορφή εκρηκτικών θραύσεων, ρηγμάτων ή και καταρρεύσεων ως αποτέλεσμα της υψηλής πίεσης του ατμού που προκαλείται από την εξάτμιση της υγρασίας τους. Στην περίπτωση κατά την οποία οι θερμικές επιδράσεις του κεραυνού είναι ιδιαίτερα ισχυρές, η μεταφορά της θερμικής ενέργειας στο εσωτερικό των υλικών μπορεί να οδηγήσει σε ξαφνική εκτόξευση πυρακτωμένων υλικών με άμεση συνέπεια την πρόκληση πυρκαγιάς.

Τέλος το κρουστικό κύμα πίεσης που συνοδεύει την εκκένωση του κεραυνού μπορεί να έχει μηχανικές επιδράσεις όπως για παράδειγμα αποκολλήσεις και εκτινάξεις τμημάτων τοιχοποιίας.

3.2.2.2 Επιπτώσεις από την συνολική μεταφορά φορτίου [5]

Μια ακόμη σημαντική παράμετρος του κεραυνικού ρεύματος η οποία έχει σημαντική επίδραση στο να προκαλέσει καταστροφές σε κατασκευές είναι το μεταφερόμενο φορτίο (σε Coulomb). Η μεγαλύτερη μεταφορά φορτίου προκύπτει σε μεγάλης διάρκειας κεραυνούς (ρεύμα που διαρκεί περίπου 1 sec) όμως σχετικά μικρής τιμής ρεύματος (κάποιες εκατοντάδες A). Όταν το ρεύμα του τόξου εισέρχεται σε ένα αγώγιμο υλικό η επιφάνεια μπορεί να λιώσει και να διαβρωθεί. Στο σημείο προσκόλλησης του τόξου είναι δυνατό να χαθούν αρκετά χιλιοστά (mm) μεταλλικού υλικού. Παρόμοια φαινόμενα παρατηρούνται σε όλα τα σημεία όπου δημιουργούνται τόξα.

3.2.2.3 Επιπτώσεις από την κλίση του ρεύματος [5]

Κατά την διάρκεια του οχετού επιστροφής (return stroke) και ακόμα περισσότερο κατά την διάρκεια των διαδοχικών εκκενώσεων παρατηρείται μια ραγδαία αύξηση της τιμής του ρεύματος. Τέτοιου είδους ταχέως μεταβαλλόμενα ρεύματα μπορούν να επάγουν τάσεις σε αθωράκιστα καλώδια, και γενικότερα υπερτάσεις σε ανοικτούς βρόγχους.

Αναφορές 3^{ου} Κεφαλαίου

1. R.H. Golde, "Lightning – Physics of lightning", vol.1, pp.85-89, Academic Press, London, 1977
2. Ι.Α. Σταθόπουλος, "Προστασία τεχνικών εγκαταστάσεων έναντι υπερτάσεων", Εκδόσεις Συμείων, Αθήνα, 1989.
3. Π. Νικολόπουλος, "Υψηλές Τάσεις Ι", Αθήνα 1994
4. Ευαγ.Λεκατσάς, "Θέματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας", Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, Αθήνα 1985
5. Coton Ian, Jenkins Nick, Hatziargyriou Nikos, Lorentzou Maria, Haigh Stephen, Hancock Mark, "Lighting protection of wind turbines", UMIST, Manchester, UK, First Edition, February 1999
6. Μικρόπουλος Ν. Παντελής, "Συστήματα αντικεραυνικής προστασίας", Τμήμα εκδόσεων Α.Π.Θ, Θεσσαλονίκη 2000
7. IEC 61400-24, Wind Turbine Generator Systems – Part 24: Lightning Protection.
8. Ian Coton, Nick Jenkins, Nikos Hatziargyriou, Maria Lorentzou, Stephen Haigh, Mark Hancock, "Lighting protection of wind turbines", UMIST, Manchester, UK, First Edition, February 1999
9. Internet, <http://www.flickr.com/photos/allenrockwell/141202584/>
10. Internet, http://www.taramtamtam.com/wallpapers/Nature/L/Lightning/index.php?pic=Lightning_4&pid=6877
11. Internet, <http://design-photography.info/impressive-examples-of-lightning-photo/>
12. Internet, <http://webcoist.com/2009/08/20/10-lightning-displays/?ref=search>
13. Internet, <http://www.flickr.com/photos/daveparrish/2639215374/>
14. Internet, http://en.wikipedia.org/wiki/File:Springfield,_Missouri_skyline,_lightning.jpg

4. ΚΕΡΑΥΝΙΚΟ ΠΛΗΓΜΑ ΣΕ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ [1]

Τα τελευταία χρόνια οι καταστροφές στις ανεμογεννήτριες από πλήγματα κεραυνού έχουν αυξηθεί. Ο αυξημένος αριθμός αλλά και το ύψος των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών έχουν σαν αποτέλεσμα, οι καταστροφές και το κόστος επισκευής να ξεπερνούν τα όρια που θα επιθυμούσαμε. Διαφορετικά από τις άλλες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις όπως τα δίκτυα μεταφοράς, τα εργοστάσια παραγωγής και τους υποσταθμούς, οι ανεμογεννήτριες χρειάζονται ειδικά συστήματα αντικεραυνικής προστασίας εξαιτίας της δομής τους αλλά και του μεγέθους τους. Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών στα οποία η διάμετρός τους φθάνει μέχρι και τα 100 m, περιστρέφονται σε απόσταση μέχρι και 150 m από το έδαφος. Επιπλέον για την κατασκευή της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιούνται μονωτικά σύνθετα υλικά όπως ο υαλοβάμβακας και ενισχυμένα πλαστικά με ίνες (πτερύγια). Χρειάζεται να αναφερθούμε ιδιαίτερα στα πτερύγια, μιας και είναι το πιο ακριβό εξάρτημα της ανεμογεννήτριας, αλλά και το πιο ευάλωτο σε άμεσο πλήγμα κεραυνού. Επίσης οι περισσότερες μελέτες και δοκιμές αντικεραυνικής προστασίας διεξάγονται πάνω σε αυτά. [1]

4.1 Πτερύγια

Τα πτερύγια είναι το πρώτο τμήμα της Α/Γ που συναντά ο κεραυνός όταν πλήττει μια ανεμογεννήτρια. Οι επιπτώσεις του πλήγματος του κεραυνού στα πτερύγια εξαρτώνται πέρα από τα χαρακτηριστικά του κεραυνού και από την δομή του πτερυγίου. Παρακάτω θα αναφερθούν διάφορα κατασκευαστικά στοιχεία των πτερυγίων που θα μας χρειαστούν και στη συνέχεια.

4.2 Δομή των πτερυγίων [1]

Τα σύγχρονα πτερύγια των ανεμογεννητριών είναι μεγάλες, κοίλες κατασκευές που παράγονται από συνθετικά υλικά, όπως για παράδειγμα πλαστικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού (Glass Reinforced Plastic, GRP), το ξύλο, σύνθεση ξύλου με μεταλλικά ελάσματα και πλαστικό ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (carbon reinforced plastic, CRP)

το οποίο χρησιμοποιείται και για κατασκευή εξειδικευμένων συστατικών της Α/Γ όπως η άκρη του άξονα των πτερυγίων με φρένα στο άκρο (μηχανισμός tip-stall). Η επιφάνεια των δύο πλευρών ενός πτερυγίου, τις περισσότερες φορές κατασκευάζεται από χωριστά φύλλα ινών γυαλιού ή άλλα συνθετικά υλικά που συγκολλούνται κατά μήκος των άκρων και των χειλών εκφυγής προς μια δομή εσωτερικής μεταφοράς φορτίου (εσωτερικό υλικό του πτερυγίου), επίσης κατασκευασμένη από ίνες γυαλιού. Εσωτερικά του πτερυγίου, υπάρχουν μεγάλες γεμάτες αέρα κοιλότητες διαμορφωμένες στο σχήμα της επιφάνειας και της εσωτερικής δομής με τέτοιο τρόπο που να διατηρούν τεντωμένο το πτερύγιο σε όλο το μήκος του. [1]



Εικόνα 4.1: Πτερύγιο Α/Γ κατά την μεταφορά του με πλοίο [19]

Το πλαστικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού (GRP) και το ξύλο είναι σαν υλικά και τα δύο μη αγώγιμα και αναμένεται να είναι επιρρεπή σε κεραυνική ζημιά παρόλο που παλαιότερα οι ελπίδες ότι ο κεραυνός δεν θα έπληττε πτερύγια κατασκευασμένα μόνο από μη αγώγιμα υλικά ήταν υψηλές. Το πλαστικό ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (CRP) παρόλο που είναι αγώγιμο αναμένεται να υποστεί ζημιά λόγω κεραυνικών πληγμάτων. Ιδανικό υλικό πτερυγίων για προστασία από κεραυνό θα ήταν το ασφάλι αλλά δεν χρησιμοποιείται πλέον για την κατασκευή ολόκληρου του πτερυγίου για

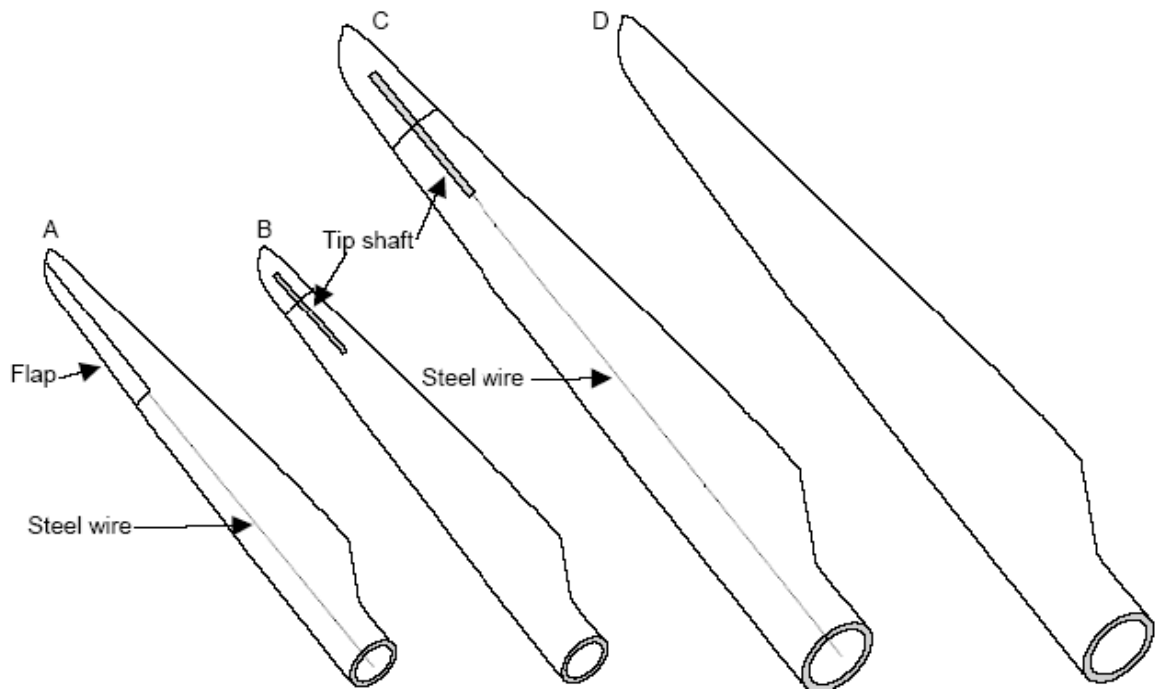
εμπορικές, συνδεδεμένες με το δίκτυο Α/Γ μιας και είναι βαρύ και καταπονείται. Ένα πολύ κοινό χαρακτηριστικό των πτερυγίων των Α/Γ είναι το φρένο άκρης το οποίο τυπικά αποτελεί το 10% έως το 15% του τμήματος του πτερυγίου. Το σύστημα του φρένου άκρης κρατάει ένα ελατήριο το οποίο απελευθερώνεται σε συνθήκες υπερβολικής ταχύτητας περιστροφής, από την φυγόκεντρο δύναμη και το φρένο άκρης κινείται προς τα έξω και περιστρέφεται κατά 90ο. [2]

4.3 Τύποι πτερυγίων και μηχανισμός καταστροφής τους [1]

Υπάρχουν διάφοροι τύποι πτερυγίων ανάλογα με τον μηχανισμό ελέγχου και φρεναρίσματος που διαθέτουν (Εικόνα 4.2).

Τα φτερά τύπου Α χρησιμοποιούν ένα πτερύγιο (πηδάλιο κλίσεως, flap) στο εξωτερικό τμήμα του χείλους προσβολής, προκειμένου να φρενάρει. Στα φτερά του τύπου αυτού τα σημεία που παρατηρείται η πτώση του κεραυνού βρίσκονται συχνά στις χαλύβδινες αρθρώσεις του πτερυγίου και παρατηρείται σημαντική φθορά δεδομένου ότι η διατομή των χαλύβδινων καλωδίων (steel wire) που χρησιμοποιούνται για την ηλεκτρική λειτουργία του συστήματος του πτερυγίου είναι συνήθως ανεπαρκής να άγει το παραγόμενο από τον κεραυνό ρεύμα.

Τα φτερά τύπου Β χρησιμοποιούν ένα σύστημα φρένου άκρης (tip brake) το οποίο κρατάει ένα ελατήριο που απελευθερώνεται σε συνθήκες υπερβολικής ταχύτητας περιστροφής από την φυγόκεντρο δύναμη. Με τα φτερά αυτού του τύπου τα σημεία που παρατηρείται η πτώση του κεραυνού εμφανίζονται σχεδόν πάντα μερικές δεκάδες εκατοστά από την πιο απομακρυσμένη άκρη, ή στις πλευρές της κινούμενης άκρης στη θέση του πιο ακραίου τέλους του άξονα (tip shaft). Απ' το σημείο πλήγματος του κεραυνού σχηματίζεται τόξο κεραυνού εσωτερικά του τμήματος των άκρων στο πιο ακραίο τέλος του άξονα των άκρων, τόξο επίσης σχηματίζεται εσωτερικά του κυρίως φτερού κάτω στη χαλύβδινη φλάντζα της βάσης, στη ρίζα του φτερού. Τέτοια εσωτερικά τόξα προκαλούν αμετάβλητη καταστροφή στο φτερό. Φτερά των τύπων Α και Β χρησιμοποιήθηκαν ευρέως στις παλαιότερης τεχνολογίας Α/Γ μεγέθους του τύπου των 100kW.



Εικόνα 4.2: Τύποι φτερών Α/Γ [1]

Τα φτερά του τύπου C είναι ένας σύγχρονος σχεδιασμός με φρένο άκρης που ελέγχεται από χαλύβδινο καλώδιο (steel wire). Στα φτερά του τύπου αυτού τα σημεία πλήγματος του κεραυνού εμφανίζονται κυρίως μερικές δεκάδες εκατοστά από την πιο απομακρυσμένη άκρη του φτερού, ή στις πλευρές της άκρης στη θέση του πιο ακραίου τέλους του άξονα της κινούμενης άκρης. Με τον τύπο αυτό φτερών όπως και με τον τύπο B, τόξο κεραυνού σχηματίζεται, εσωτερικά του τμήματος της κινούμενης άκρης, ανάμεσα στο σημείο πλήγματος του κεραυνού και του πιο ακραίου του άξονα, προκαλώντας ευρύτατη και μεγάλη καταστροφή. Στα φτερά τύπου C, η καταστροφή στο κυρίως φτερό παρατηρείται κυρίως όταν το χαλύβδινο καλώδιο δεν είναι σε θέση να άγει το κεραυνικό ρεύμα. Τα χαλύβδινα καλώδια που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό είναι ελάχιστης διαμέτρου 10mm για φτερά μήκους 17m. Τέτοια καλώδια είναι ικανά να άγουν το περισσότερο παραγόμενο ρεύμα, και για το λόγο αυτό προστατεύουν το κυρίως φτερό από την καταστροφή.

Το φτερό του τύπου D κατασκευάζεται εξ ολοκλήρου από μη αγώγιμα υλικά. Όπως και με τους υπόλοιπους τύπους φτερών, τα σημεία πλήγματος του κεραυνού παρατηρούνται κυρίως κοντά στην άκρη του φτερού. Σε σύγκριση με τους άλλους τύπους φτερών, τα σημεία πλήγματος μπορούν επίσης να βρεθούν τυχαία διανεμημένα σε άλλες θέσεις κατά μήκος του φτερού. Χαρακτηριστικοί τύποι

καταστροφής που υφίστανται τα πτερύγια στα σημεία πλήγματος του κεραυνού είναι η αποφλοιώση και αποτέφρωση του συνθετικού υλικού της επιφάνειας, η υπερθέρμανση ή τήξη των μεταλλικών μερών, καθώς επίσης και η απόσχιση κομματιών των απώτατων άκρων των πτερυγίων. Όσον αφορά την διάτρηση της επιδερμίδας του πτερυγίου θα μπορούσε πολύ παραστατικά να λεχθεί ότι ο κεραυνός μοιάζει σαν να «ράβει» μέσα και έξω από την επιδερμίδα του πτερυγίου κατά μήκος του.

Η μεγαλύτερη και σοβαρότερη καταστροφή στα πτερύγια Α/Γ προκαλείται κατά τη δημιουργία τόξου κεραυνού στο εσωτερικό του πτερυγίου. Τα τόξα αυτά μπορούν να σχηματιστούν στις γεμάτες αέρα κοιλότητες μέσα στο πτερύγιο ή κατά μήκος των εσωτερικών επιφανειών επαφής των φύλλων κατασκευής του πτερυγίου. Ένας άλλος τύπος καταστροφής παρατηρείται όταν το παραγόμενο ρεύμα ή μέρος αυτού άγεται μέσα ή μεταξύ των στρωμάτων του συνθετικού υλικού, πιθανώς εξαιτίας του ότι στα στρώματα αυτά συσσωρεύεται και συγκρατείται κάποια υγρασία. Το κρουστικό κύμα που προκαλείται από τέτοια εσωτερικά τόξα μπορεί κυριολεκτικά να προκαλέσει έκρηξη στο πτερύγιο αποσχίζοντας το επιφανειακό τμήμα του πτερυγίου κατά μήκος των άκρων και απ' το εσωτερικό δοκάρι. Μπορούν να παρατηρηθούν όλες οι βαθμίδες καταστροφής του πτερυγίου, από το ράγισμα της επιφάνειας έως την ολοκληρωτική αποσάθρωση και αποσύνθεση του φτερού. Σε κάποιες περιπτώσεις τα κύματα πίεσης έχουν διαδοθεί απ' το πτερύγιο που πλήγεται και μέσω της πλήμνης προς τα άλλα πτερύγια προκαλώντας μεγάλες καταστροφές και σε αυτά.

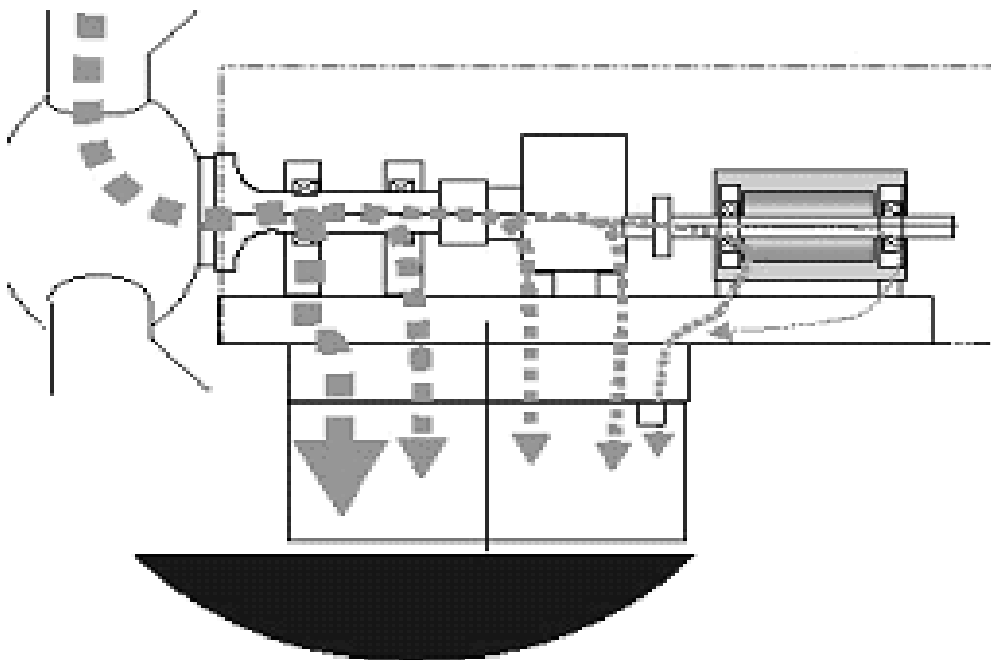
Τα εσωτερικά τόξα συχνά σχηματίζονται ανάμεσα στο σημείο πλήγματος του κεραυνού στην άκρη του πτερυγίου και κάποιου αγωγίμου τμήματος εσωτερικά του πτερυγίου. Με τον τύπο C, η καταστροφή συχνά περιορίζεται στην περιοχή της άκρης, ενώ το κυρίως πτερύγιο δεν υφίσταται βλάβη. Ευρύτερη καταστροφή στα πτερύγια τύπου C έχει παρατηρηθεί, όταν το τόξο σχηματιστεί στο εσωτερικό του κυρίως πτερυγίου. Χαρακτηριστικά αυτό έχει συμβεί σε περιπτώσεις όπου το χαλύβδινο καλώδιο που ελέγχει το φρένο της άκρης ήταν ανεπαρκούς διατομής ώστε να άγει το κεραυνικό ρεύμα απ' το άκρο του άξονα προς την πλήμνη. Στα φτερά τύπου A, το κυρίως πτερύγιο καταστρέφεται.

Το φαινόμενο που ευθύνεται για την μεγάλη δομική καταστροφή των πτερυγίων των Α/Γ είναι επομένως ο σχηματισμός του κρουστικού κύματος γύρω απ' το τόξο του κεραυνού στο εσωτερικό του πτερυγίου. Δευτερεύουσα καταστροφή μπορεί επίσης

να εμφανιστεί όταν το τόξο κεραυνού σχηματίζεται στην εξωτερική επιφάνεια ή όταν το παραγόμενο ρεύμα άγεται από μεταλλικά στοιχεία (μέρη) με ανεπαρκή διατομή. [1]

4.4 Προστασία ανεμογεννήτριας. [1]

Το αντικεραυνικό σύστημα προστασίας πρέπει να είναι πλήρως ολοκληρωμένο μέσα στα διάφορα μέρη της ανεμογεννήτριας, ώστε να μπορεί να εγγυηθεί ότι όλα τα μέρη θα παραμείνουν ασφαλές σε μια πρόσκρουση κεραυνού, αλλά και ότι το ρεύμα κεραυνού θα οδηγηθεί με ασφάλεια από τα σημεία σύλληψης του στη γη. Όταν ο κεραυνός πλήξει τα πτερύγια το ρεύμα διασχίζει όλη την κατασκευή και οδηγείται στο έδαφος. Πιο συγκεκριμένα το ρεύμα περνάει μέσα από το πτερύγιο και από τα ρουλεμάν βήματος του πτερυγίου και οδηγείται στην πλήμνη και στον κύριο άξονα. Μετά μέσω του ρουλεμάν του κύριου άξονα κατευθύνεται προς την νασέλλα. Έπειτα μέσω του ρουλεμάν παρέκκλισης εισέρχεται στον πύργο και καταλήγει στο έδαφος μέσω της βάσης.



Εικόνα 4.3: Διανομή ρεύματος κεραυνού. [3]

Τα πιο ευάλωτα, σε άμεσο κεραυνικό πλήγμα, μέρη της ανεμογεννήτριας είναι τα πτερύγια, ο πύργος, η πλήμνη, το πλαίσιο της νασέλλας και τα αλεξικέραυνα στην

κορυφή της νασέλλας. Ωστόσο συνήθως τα πτερύγια είναι αυτά που δέχονται άμεσο πλήγμα από κεραυνό.



Εικόνα 4.4: Α/Γ μετά από πλήγμα κεραυνού [4]

Οι βασικοί λόγοι για τους οποίους οι ανεμογεννήτριες είναι ευάλωτες σε πλήγματα κεραυνού, και χρειάζονται ειδική αντικεραυνική προστασία σε σχέση με τις άλλες κατασκευές είναι οι ακόλουθοι: [1]

- Το ύψος: Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες μπορούν να ξεπεράσουν ακόμη και τα 150 μέτρα σε ύψος. Όπως είναι γνωστό όσο πιο ψηλή είναι μια κατασκευή τόσο πιθανότερο είναι να δεχτεί πλήγμα από κεραυνό. Μάλιστα σε κατασκευές

που το ύψος τους ξεπερνάει τα 60 μέτρα, μπορούν να προκύψουν και πλήγματα σε πλευρικά σημεία τη κατασκευής. Αυτά τα πλευρικά χτυπήματα αποτελούν έναν σοβαρό λόγο ανησυχίας για τις ανεμογεννήτριες, δεδομένου ότι ακόμα και προστατευμένα φτερά που πλήττονται πλευρικά, μπορεί να υποστούν σοβαρές ζημιές.

- Η περιοχή: Συνήθως οι ανεμογεννήτριες εγκαθίστανται σε περιοχές (παράκτιες, λόφοι και κορυφογραμμές μεγάλων βουνών) που εύκολα πλήττονται από κεραυνούς. Μειονέκτημα αυτών των περιοχών είναι ότι οι τιμές της αντίστασης γείωσης δεν είναι τόσο ικανοποιητικές.
- Το υλικό των εξαρτημάτων: Τα περισσότερα εκτεθειμένα εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας όπως είναι τα πτερύγια και το κάλυμμα της νασέλλας, κατασκευάζονται από σύνθετα υλικά τα οποία δεν μπορούν ν' αντέξουν στο απευθείας χτύπημα κεραυνού και στο καθοδηγούμενο ρεύμα κεραυνού.
- Τις περιστροφές: Τα πτερύγια αλλά και η νασέλλα περιστρέφονται ανάλογα με την ένταση και διεύθυνση του ανέμου. Υπάρχει κίνδυνος ο κεραυνός να έρθει σε επαφή με το πτερύγιο σε παραπάνω από ένα σημείο του περιστρεφόμενου πτερυγίου, αλλά ακόμα και σε επιπλέον πτερύγιο της ανεμογεννήτριας. Αυτό γίνεται γιατί ο κεραυνός αποτελείται από αρκετούς ξεχωριστούς ηλεκτρικούς παλμούς, σε χρονικό διάστημα 1 sec, χρόνος αρκετός για να χτυπήσει παραπάνω από ένα πτερύγιο.
- Το ρεύμα κεραυνού: Το ρεύμα κεραυνού πρέπει να οδηγηθεί διαμέσου της ανεμογεννήτριας στη γη, δια του οποίου σημαντικά μέρη του ρεύματος θα περάσουν μέσα ή κοντά από όλα σχεδόν τα εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας.
- Αλληλοσύνδεση: Με την αλληλοσύνδεση των ανεμογεννητριών στα αιολικά πάρκα αυξάνονται οι πιθανότητες πρόσκρουσης κεραυνού. [1]

4.5 Το ρεύμα κεραυνού στις δοκιμές που διεξάγονται στα εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας.

4.5.1 Παράμετροι και προδιαγραφές των δοκιμών. [5],[6],[8]

Αρχικά θα συνοψίσουμε τις προδιαγραφές δοκιμών για το εργαστήριο, όπου διεξάγονται έρευνες για τη συμπεριφορά του ρεύματος κεραυνού στα διάφορα μέρη της ανεμογεννήτριας. Σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα (ISO) προτείνονται οι διαδικασίες για τις συγκεκριμένες δοκιμές. [5] Επιπλέον λαμβάνονται υπόψη τα αποτελέσματα των αναφορών από τις τελευταίες έρευνες για την αντικεραυνική προστασία των πτερυγίων και των εδράνων της ανεμογεννήτριας. Στη συνέχεια γίνεται επεξήγηση των παραμέτρων και προδιαγραφών των δοκιμών.

Τέσσερις βασικοί παράμετροι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη:

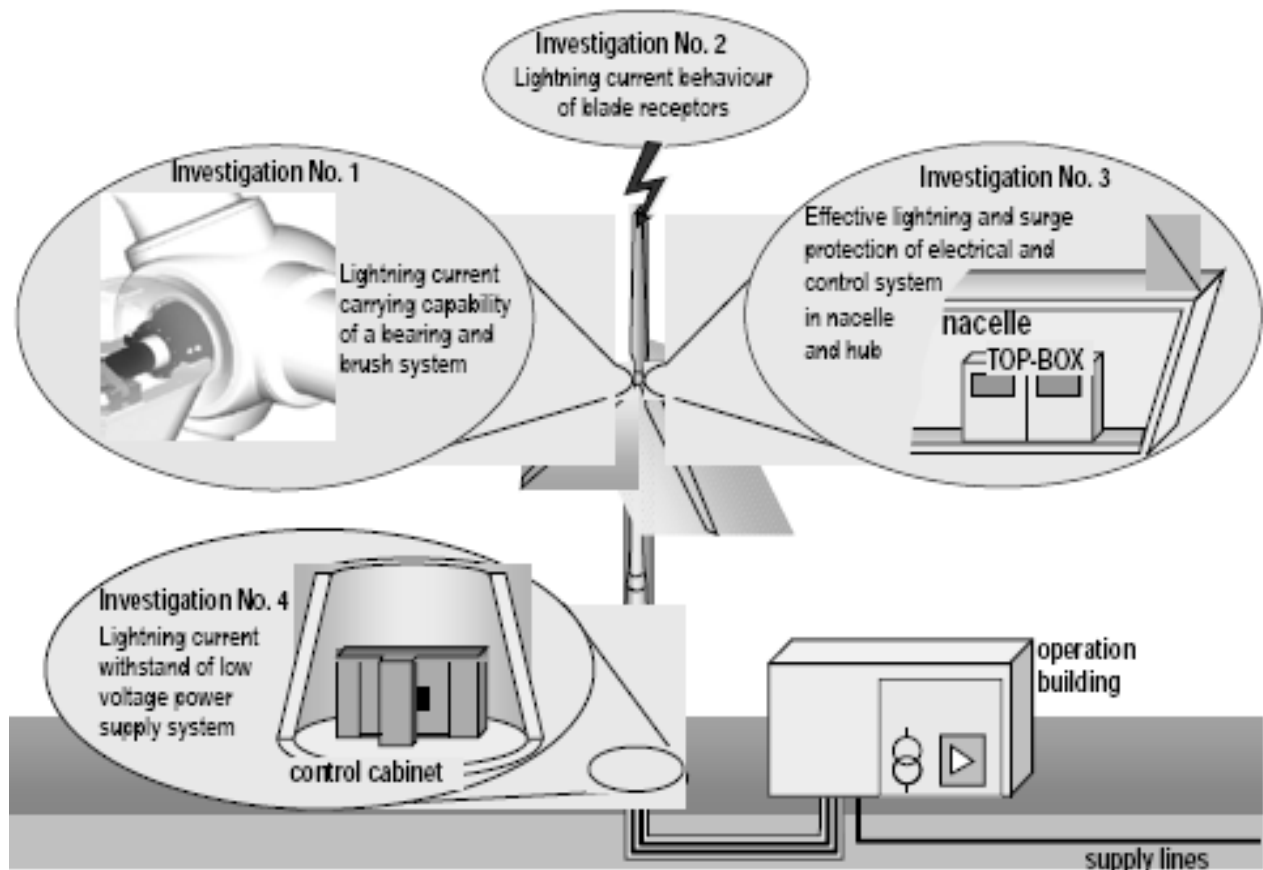
- *Η πιθανότητα πρόσκρουσης.* Σε επίπεδες περιοχές και σε χαμηλές κατασκευές δημιουργούνται κυρίως κεραυνοί προς τα κάτω, ενώ στις ψηλότερες εκτεθειμένες κατασκευές όπως οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες δημιουργούνται και κεραυνοί προς τα πάνω.
- *Οι παράμετροι του ρεύματος κεραυνού που σχετίζονται με το σημείο της πρόσκρουσης.* Γενικά οι κρίσιμοι παράμετροι του ρεύματος κεραυνού που λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό των τιμών δοκιμής στα διαφορετικά (LPS) μέρη και για διαφορετικό επίπεδο αντικεραυνικής προστασίας (LPL), περιγράφονται σε λίστα στο τελευταίο πρότυπο αντικεραυνικής προστασίας του Διεθνούς ηλεκτροτεχνικού οργανισμού IEC 62305-1. [6] Αναφέρεται καθαρά ότι αυτή η λίστα D.3 ισχύει για τους κατερχόμενους αλλά και για τους ανερχόμενους κεραυνούς. [7] Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η λίστα προτείνει μεγαλύτερη τιμή για το φορτίο ρεύματος μακράς διάρκειας για κεραυνούς από τη γη προς τα σύννεφα. Αυτά τα αποτελέσματα έχουν επιβεβαιωθεί από πρόσφατες έρευνες που έγιναν σε ανεμογεννήτριες στην Ιαπωνία.
- *Οι πιθανές καταστροφές που μπορεί να προκληθούν από το ρεύμα κεραυνού.* Οι μηχανικές επιδράσεις του κεραυνού σχετίζονται με τη τιμή κορυφής του ρεύματος κεραυνού και την ειδική ενέργεια. Τα θερμικά αποτελέσματα

σχετίζονται με την ειδική ενέργεια (W/R) όταν εμπλέκονται ισχυρές συνδέσεις και στο φορτίο όταν αναπτύσσεται τόξο κατά την εγκατάσταση. [6] Στη τελευταία έκδοση του IEC 62305-1 περιγράφονται και οι βασικοί παράμετροι που χρησιμοποιούνται στο εργαστήριο, αλλά και οι πιθανές επιδράσεις του ρεύματος κεραυνού στα διάφορα εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας. Δεν περιλαμβάνονται ιδιαίτερα μέρη της ανεμογεννήτριας που πιθανότατα να επηρεάζονται από το ρεύμα κεραυνού, το οποίο έχει προκληθεί από απευθείας χτύπημα. [8]

- *Προσομοίωση ρεύματος κεραυνού που αποσκοπεί στη διενέργεια των δοκιμών.* Το IEC 62305-1 περιλαμβάνει τις απαιτήσεις για την προσομοίωση του ρεύματος κεραυνού στις δοκιμές. Περιγράφεται ότι οι δοκιμές για το πρώτο μικρό χτύπημα κεραυνού, αλλά και για το μεγάλο χτύπημα μπορούν να εφαρμοστούν σαν δύο ανεξάρτητες δοκιμές ή σαν μια συνδυαστική δοκιμή. Για όλες τις δοκιμές που διενεργούνται εις το εξής, χρησιμοποιείται μια γεννήτρια δοκιμής που περιγράφεται στο IEC 62305-1. Το σύστημα ελέγχου αυτής της γεννήτριας έχει τη δυνατότητα να συνδυάζει το ρεύμα μακράς διάρκειας με το πρώτο μικρό χτύπημα μέσα σε μία ακολουθία, ή να τα ξεχωρίσει σε δύο ξεχωριστές ακολουθίες και κατά συνέπεια να εξετάσει τα αποτελέσματα αυτών των δύο διαφορετικών διαδικασιών.

4.5.2 Επιλεγμένες δοκιμές του ρεύματος κεραυνού στα διάφορα μέρη της ανεμογεννήτριας.

Οι δοκιμές που θα περιγράψουμε παρακάτω έχουν εκτελεσθεί σε συνεργασία με διεθνείς βιομηχανίες κατασκευής ανεμογεννητριών. Στην εικόνα 4.5 παρουσιάζεται μια επισκόπηση των εργαστηριακών δοκιμών που εκτελέστηκαν ξεχωριστά στα διάφορα μέρη της ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 4.5 : Επισκόπηση εργαστηριακών ερευνών. [4]

1) Δοκιμή Νο1 : Μεταφορά ρεύματος κεραυνού από το έδρανο και το σύστημα ψυκτρών. Τα εξαρτήματα που δοκιμάζονται, επιβαρύνονται από ένα συνδυασμό, αρχικά ενός μικρού χτυπήματος και ενός μεγάλου με ρεύμα κορυφής έως και 100 KV και συνολικό φορτίο έως 400C.

- Διαδικασία δοκιμής : Το δείγμα που εξετάζεται αποτελείται από ένα έδρανο ανεμογεννήτριας συμπεριλαμβανομένου ενός πρόσθετου συστήματος ψυκτρών. Καθώς το σύστημα ψυκτρών είναι συνδεδεμένο παράλληλα με την επαφή του εδράνου , αυτή η παράλληλη διαδρομή ανακουφίζει το έδρανο, μειώνοντας την ένταση του ρεύματος που διέρχεται από αυτό. Μετρώνται το συνολικό ρεύμα δοκιμής I_{total} και το μερικό ρεύμα που διέρχεται από το σύστημα ψυκτρών I_{brush} , ενώ το μερικό ρεύμα που διέρχεται από το ρουλεμάν υπολογίζεται από τη σχέση :

$$I_{bearing} = I_{total} - I_{brush}$$

Στη συνέχεια όλο το σύστημα ενώθηκε απευθείας γαλβανικά με την γεννήτρια δοκιμής. Το κύριο ηλεκτρόδιο δοκιμής δεν στερεώθηκε μηχανικά. Επομένως εξετάσθηκε η μηχανική κίνηση του ηλεκτροδίου η οποία προήλθε από το παλμό ρεύματος, αλλά και η τήξη, διάβρωση που δημιουργήθηκαν από το ρεύμα μακράς διάρκειας. Το βοηθητικό ηλεκτρόδιο και το κύριο σύστημα ψυκτών παριστάνονται μόνο από ένα ακίνητο ηλεκτρόδιο ίδιας γεωμετρίας και ίδιου υλικού με το ηλεκτρόδιο του συστήματος επαφής. Ωστόσο οι έρευνες έδειξαν ότι στοιχεία που περιστρέφονται σε υψηλές ταχύτητες, τα οποία είναι ικανά να παράγουν ένα υδροδυναμικό μονωτικό στρώμα μεταξύ αυτών και των στοιχείων μέσα στα οποία περιστρέφονται είναι τρωτά σε πλήγματα κεραυνού (ειδικά σε ρεύματα μεγάλης διάρκειας). [8] Η αληθινή ταχύτητα περιστροφής του συστήματος ψυκτών που εξετάσθηκε, θεωρήθηκε ότι είναι αρκετά χαμηλή, έτσι οι επιπτώσεις είναι αμελητέες. Σε αυτή την ειδική περίπτωση, το γεγονός, ότι το δείγμα εξετάσθηκε σε στάσιμη κατάσταση, ενδέχεται να δημιουργείται μια πιο δύσκολη περίπτωση, καθώς εμφανίζεται τήξη σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Σε μια κινούμενη κατάσταση τα αποτελέσματα της τήξης εμφανίζονται σε διαφορετικά σημεία του συστήματος ψυκτών, διαδικασία εξαρτώμενη από το συνολικό χρόνο ροής του ρεύματος κεραυνού.

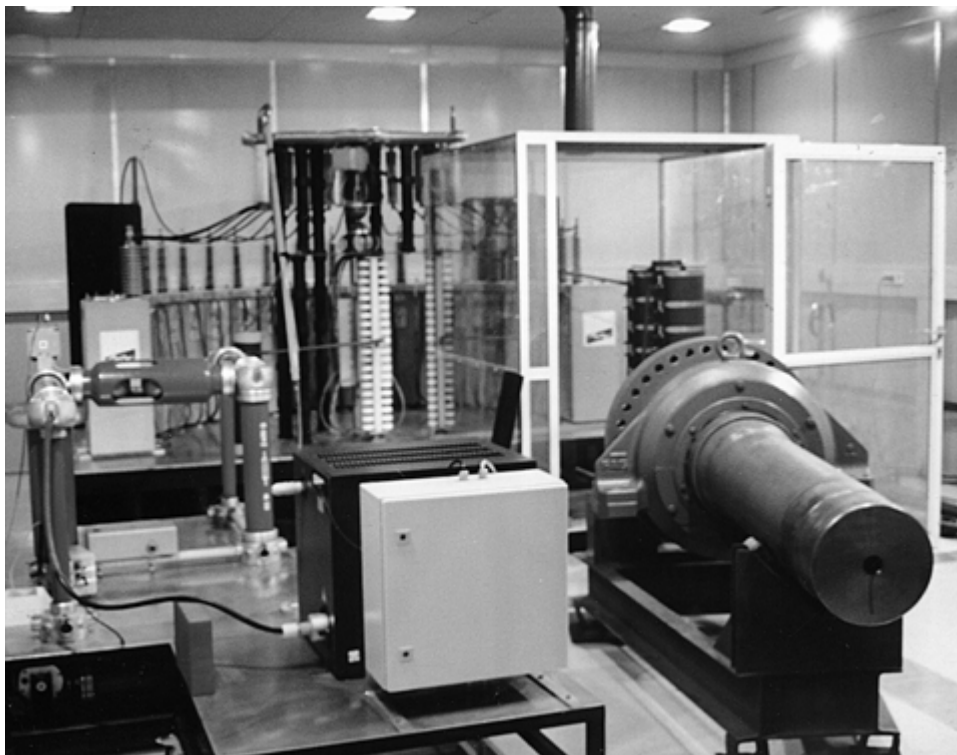
Αποτελέσματα δοκιμής : Όλες οι μετρήσεις έδειξαν, ότι από το ρεύμα πριν από το παλμό ρεύματος με μεγαλύτερο ποσοστό μεταβολής ρεύματος di/dt , ένα αξιοσημείωτο μέρος του διαρρέεται από το σύστημα ψυκτών, εξαιτίας της σχετικά αυξημένης επαγωγής του εδράνου. Στην αρχική φάση του παλμού ρεύματος η διανομή του ρεύματος καθορίζεται από τις σύνθετες επαγωγικές αντιστάσεις του συστήματος. Η διανομή του ρεύματος ανάμεσα στις δύο παράλληλες πορείες υπολογίζεται από τη σχέση

$$\frac{I_{brush}}{I_{bearing}} \sim \frac{L_{bearing}}{L_{brush}}$$

Εξαιτίας του χαμηλού ποσοστού μεταβολής του ρεύματος στο τέλος του παλμού, η διανομή των μερικών ρευμάτων κεραυνού, κυρίως θα επηρεάζεται από τις ωμικές αντιστάσεις του συστήματος.

$$\frac{I_{brush}}{I_{bearing}} \sim \frac{R_{bearing}}{R_{brush}}$$

Για να αυξηθεί το μερικό ρεύμα που ρέει μέσα από τις ψύκτρες, πρέπει να μειωθεί η ωμική αντίσταση της παράλληλης διαδρομής (π.χ. με πολλαπλές παράλληλες συνδέσεις) . Στην εικόνα 4.6 φαίνεται η το έδρανο μιας ανεμογεννήτριας συνδεδεμένο σε μια γεννήτρια ρεύματος κεραυνού 200 KA 10/350. [4]

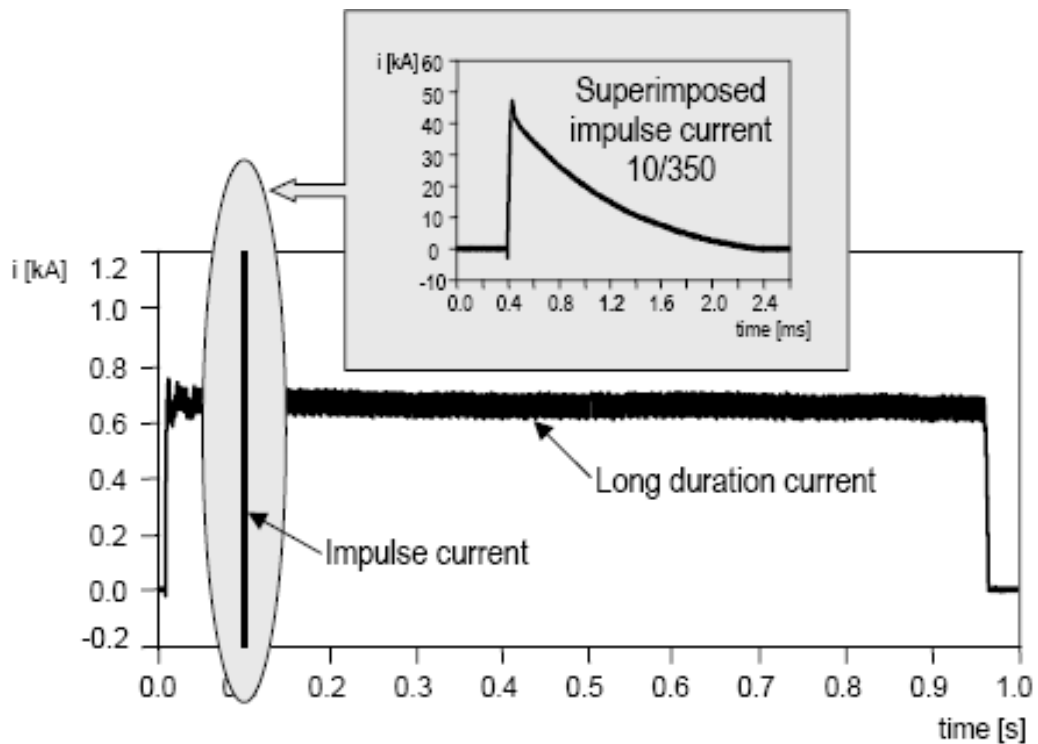


Εικόνα 4.6 : Εγκατάσταση εργαστηρίου για τη δοκιμή ρεύματος κεραυνού στο έδρανο. [5]

2) Δοκιμή Νο2 : Συμπεριφορά ρεύματος κεραυνού σε δείγματα από άκρα πτερυγίων ανεμογεννήτριας.

- *Παράμετροι ρεύματος κεραυνού.* Το αντικείμενο δοκιμής διαρρέεται από παλμούς ρεύματος εντάσεως μέχρι και 200 KA (10/350μs) και ο συνδυασμός εντάσεως του πρώτου μικρού χτυπήματος 50kA (10/350μs) και του μεγάλου εφαρμόστηκαν σε μια βαθμίδα δοκιμής, ο παλμός ρεύματος υπερτίθεται του ρεύματος μακράς διάρκειας. Επίσης σε αυτές τις εξετάσεις παραμέτρων του

ρεύματος για το μακρύ χτύπημα υπερβαίνουν τις τιμές, που έχουν καθοριστεί στα πρότυπα ρευμάτων κεραυνού, αλλά αντιπροσωπεύουν τιμές που μετρήθηκαν σε πραγματικές ανεμογεννήτριες ή σε πύργους τηλεπικοινωνίας με παρόμοιο ύψος. Στην εικόνα 4.7 φαίνεται η κυματομορφή του ρεύματος και στον πίνακα 4.1 φαίνονται οι παράμετροι του ρεύματος αυτού του συνδυασμού εντάσεως. [9]



Εικόνα 4.7 : Κυματομορφή ρεύματος [5]

Parameters Long duration current			
<i>Open-circuit voltage</i> U_{DC} [V]	Current I_{DC} [A]	Charge Q_{Long} [As]	Duration T [ms]
≈ 600	≈ 660	≈ 635	≈ 960
Parameters (10/350 μ s)			
<i>Impulse current</i>	\hat{i}_{max} [kA]	Q_{Stroke} [As]	$\frac{W}{R}$ [$\frac{kJ}{\Omega}$]
	≈ 48	≈ 28	≈ 700

Πίνακας 4.1 : Παράμετροι ρεύματος.[5]

- *Διαδικασία δοκιμής* : Και για τους δύο τύπους δοκιμαστικών ρευμάτων κεραυνού, το ρεύμα εγχύθηκε μέσω ενός αγωγού ανάφλεξης στην άκρη ή στην επιφάνεια των διαφορετικών δειγμάτων δοκιμής. Κατά τη διάρκεια του 10/350 παλμού ρεύματος η ανάφλεξη του αγωγού εξατμίζεται και το ρεύμα ρέει διαμέσου ενός ανοιχτού τόξου από το ηλεκτρόδιο δοκιμής στο δείγμα δοκιμής. Πρέπει να ληφθούν υπόψη η επίδραση των διαφορετικών ηλεκτροδίων δοκιμής καθώς και οι αποστάσεις των κενών πάνω στο τόξο. Σε αυτή τη βαθμίδα δοκιμής χρησιμοποιήθηκε η αρχή του απευθείας ηλεκτροδίου. Η απόσταση του ηλεκτροδίου επιλέχθηκε περίπου στα 50 mm. Επιπλέον η διαδικασία προσαρμόστηκε με δύο τρόπους, με οριζόντιο αλλά και με κάθετο προσανατολισμό του τόξου.

- Ø Τα δείγματα δοκιμής ήταν μηχανικά επισκευασμένα, επομένως δεν εξετάστηκαν μηχανικές επιδράσεις.

- Ø Δεν αξιολογήθηκε η ικανότητα παρεμπόδισης των εξεταζόμενων άκρων των πτερυγίων. Τα διαφορετικά σημεία έγχυσης των ρευμάτων δοκιμής πάνω στην επιφάνεια του δείγματος είχαν επιλεχτεί από προηγούμενη δοκιμή.

- Ø Εξαιτίας του περιορισμένου χώρου μέσα στο εργαστήριο ,αλλά και του περιορισμού της μέγιστης σύνθετης αντίστασης του δείγματος που βρίσκεται υπό δοκιμή. οι δοκιμές εκτελούνται μόνο σε μέρη της ανεμογεννήτριας.

- *Αποτελέσματα δοκιμής* : Ειδικά για τη συνδυασμένη ένταση με τον παλμό ρεύματος και το ρεύμα μακράς διάρκειας, θα μπορούσε να παρατηρηθεί έντονη διάβρωση στην περιοχή σύλληψης. Κατά τη διάρκεια μερικών δοκιμών το τόξο μετακινήθηκε προς την άκρη του δείγματος του πτερυγίου, δημιουργώντας έτσι τήξη στις γωνίες. Οι επιπτώσεις των ρευμάτων κεραυνού στους αισθητήρες σύλληψης των πτερυγίων, που δημιουργήθηκαν στο εργαστήριο έχουν μεγάλη ομοιότητα με αυτές μερικών πτερυγίων που χτυπήθηκαν από φυσιολογικό κεραυνό.

3) *Δοκιμή Νο3 : Κεραυνός και απορρόφηση υπερτάσεων στο ηλεκτρικό σύστημα της νασέλλας και της πλήμνης*. Εξετάστηκε η αποτελεσματικότητα της αντικεραυνικής προστασίας και της απορρόφησης υπερτάσεων του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού συστήματος της νασέλλας και της πλήμνης, με το παράδειγμα του συστήματος

ελέγχου κλίσης (pitch control). Τα συστήματα κλίσης και οι συνδεδεμένοι κινητήρες στη πλήμνη του στροφέα χρησιμεύουν για να ρυθμίζουν τα πτερύγια [5]

- *Περιγραφή του συστήματος ελέγχου κλίσης* : Το σύστημα ελέγχου κλίσης που εξετάζεται, χρησιμοποιεί εφεδρικό πυκνωτή, αρκετούς AC κινητήρες, AC μετατροπείς, για επικοινωνία ένα σειριακό σύνδεσμο (Profibus DP) και αρκετούς αισθητήρες αλλαγής θέσεως. Όλες οι γραμμές μεταφοράς ισχύος προστατεύονται από δεύτερης κατηγορίας SPDs σύμφωνα με το IEC 61643-1. [10] Τα SPDs έχουν εγκατασταθεί σε μια “1+1” διαμόρφωση, που σημαίνει ότι ένα MOV-type SPD έχει συνδεθεί από τη γραμμή στον ουδέτερο και άλλο ένα SPD τύπου διάκενου σπινθηρισμού από τον ουδέτερο στη γείωση. Οι γραμμές δεδομένων προστατεύονται από αναστολές (lightning arrester) πολλαπλών σταδίων δοκιμασμένοι σύμφωνα με το IEC 61643-21. [11] Στο αρχικό στάδιο περιλαμβάνουν ένα ισχυρό αναστολέα διάκενου και στην κάθοδο του στοιχείου αποσύζευξης, μια δίοδος εξασφαλίζει ένα χαμηλό επίπεδο ασφαλείας.

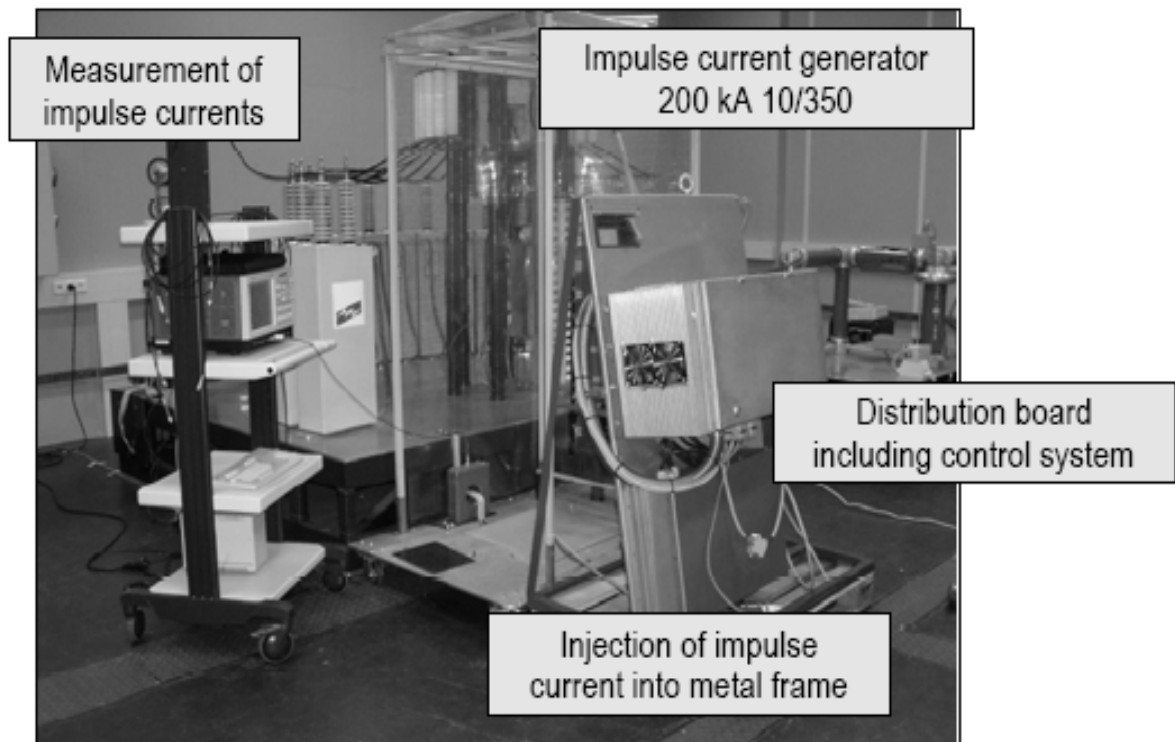
- *Παράμετροι ρεύματος κεραυνού* : Θεωρήθηκε ότι το σύστημα ελέγχου κλίσης και η καλωδίωση του εγκαταστάθηκαν σε ΖΩΝΗ 1 αντικεραυνική προστασία, που αυτό σημαίνει ότι δεν παρουσιάζονται απευθείας ρεύματα κεραυνού αλλά ξαφνική αύξηση ροής ρεύματος μέσα στις ηλεκτρικές γραμμές του συστήματος. Επιπλέον το ολοκληρωμένο σύστημα οδήγησης κλίσης, αποτελούμενο από μια μονάδα ελέγχου, AC κινητήρες, αισθητήρες θέσης και η πλήρης καλωδίωση μεταξύ αυτών των διαφορετικών στοιχείων επιβαρύνονται από το μαγνητικό πεδίο, το οποίο παράγεται από απευθείας ρεύματα κεραυνού που ρέουν στη περιβάλλουσα μεταλλική πλήμνη.

- *Διαδικασία δοκιμής* : Επομένως το ολοκληρωμένο σύστημα δοκιμάστηκε με τις ακόλουθες διαδικασίες :

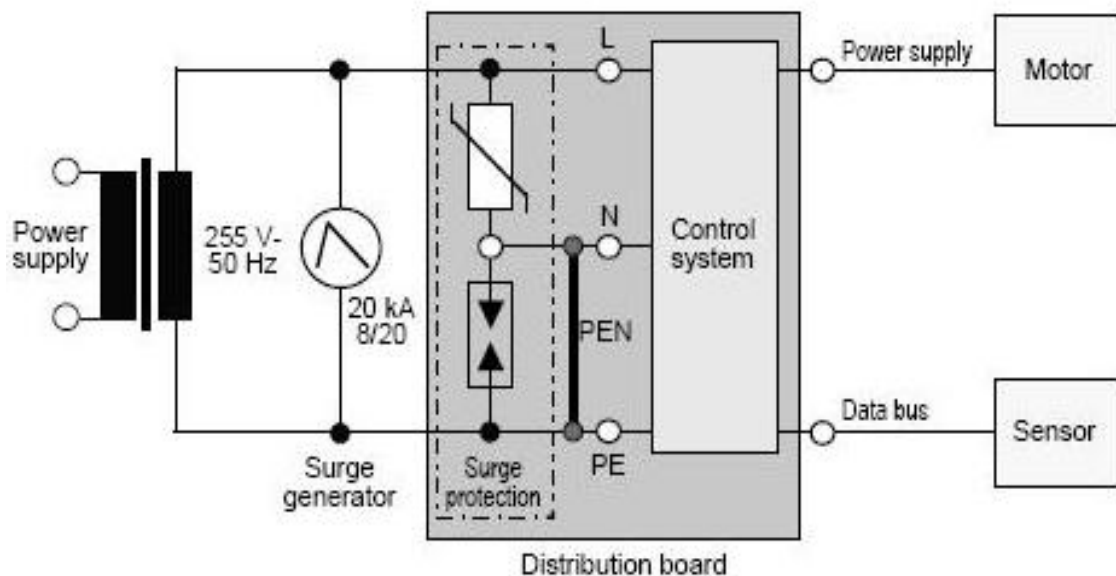
- *Ø Ρεύματα κεραυνού μέχρι και 100 KA (10/350)*: Παλμοί ρεύματος μέχρι και 100 KA (10/350) εγχύθηκαν μέσα σε ένα καθορισμένο μέταλλο, βάση συναρμολόγησης με σκοπό να εξετασθεί η συμπεριφορά του ολοκληρωμένου συστήματος μέσα στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τα ρεύματα κεραυνού. Ελέγχθηκαν οι επακόλουθοι παλμοί ρεύματος μέσα στη καλωδίωση του ολοκληρωμένου συστήματος. Οι χαρακτηριστικές τιμές I_{max} , Q_{stroke} και W/R των ρευμάτων κεραυνού προσδιορίστηκαν για κάθε δοκιμή παλμού. Επίσης ελέγχθηκε η λειτουργική αντοχή του συστήματος ελέγχου κλίσης κατά τη διάρκεια της έγχυσης των

απευθείας ρευμάτων κεραυνού μέσα στη βάση συναρμολόγησης με σκοπό να επιβεβαιωθεί οποιαδήποτε επιρροή από αγωγήμη παρέμβαση στη μονάδα ελέγχου προερχόμενη από τις επιπτώσεις των κοντινών ρευμάτων κεραυνού.

- Ø *Δοκιμή παλμού 8/20 σε χαμηλής τάσης παροχή ηλεκτρικής ισχύος* : Παλμοί ρεύματος 8/20 εγχύθηκαν απευθείας στις γραμμές μεταφοράς ισχύος και στις γραμμές δεδομένων με σκοπό να ελεγχθεί η ανθιστάμενη αύξηση του ρεύματος του συνδεδεμένου εξοπλισμού. Κατά τη διάρκεια αυτής της δοκιμής ελέγχθηκαν ο συντονισμός των εγκατεστημένων εξωτερικών SPDs στις γραμμές ισχύος και στις γραμμές δεδομένων και τα στοιχεία προστασίας από υπερτάσεις που ήταν εγκατεστημένα μέσα στο συνδεδεμένο εξοπλισμό. Το σύστημα κλίσης επιπλέον δοκιμάστηκε χρησιμοποιώντας έναν παλμό ρεύματος κάτω από τους όρους των υπηρεσιών. Αυτό σημαίνει ότι ο εξοπλισμός που προστατευόταν και τα εξωτερικά SPDs, δοκιμάστηκαν σε ένα κοινό σύστημα κάτω από τους πραγματικούς όρους αυτών των υπηρεσιών. Παλμοί ρεύματος και μερικά ρεύματα κεραυνού εγχύθηκαν και την ίδια στιγμή ο εξοπλισμός που προστατεύεται, ενεργοποιείται και συνδέεται στην ονομαστική του τάση, καθώς εκτελείται και μεταφορά δεδομένων μέσα στο σύστημα. Για παράδειγμα η δοκιμή του ρεύματος υπερφόρτισης που ρέει παράλληλα με την τροφοδοσία της μονάδας ελέγχου του συστήματος κλίσης, εκτελέστηκε με ρεύμα εκφόρτισης 40 kA 8/20. Ο παλμός ρεύματος εγχύθηκε σε αυτή την περίπτωση από την γραμμή σε έναν αγωγίμο στύλο, συνδεδεμένο σε κύρια τάση 255 V. Στην εικόνα 4.8 φαίνεται όλη αυτή η εργαστηριακή προετοιμασία, για να εκτελεστούν αυτές οι δοκιμές και στη εικόνα 4.9 φαίνεται το ηλεκτρικό σχέδιο με τον παλμό ρεύματος στην μονάδα ελέγχου του συστήματος κλίσης. [6]



Εικόνα 4.8 : Δοκιμή συστήματος κλίσης ανεμογεννήτριας. [7]



Εικόνα 4.9 : Ηλεκτρικό διάγραμμα παλμού ρεύματος.[7]

Προστασία της γραμμής δεδομένων : Επιπλέον εκτελέστηκε η δοκιμή κάτω από συνθήκες λειτουργίας για την προστασία της γραμμής δεδομένων (Profibus DP) από υπερεντάσεις. Ο σκοπός ήταν να εξετασθεί η παρέμβαση στις γραμμές

σύνδεσης του Profibus DP συστήματος που προερχόταν από τις επιπτώσεις του κεραυνού. Επομένως 8/20 παλμοί ρεύματος μέχρι και 5 kA εγχύθηκαν κατευθείαν μέσα στο μεταφορέα δεδομένων. Η έγχυση των 8/20 ρευμάτων εκτόνωσης πραγματοποιήθηκε με δυο διαφορετικούς τρόπους σύζευξης :

- 1) Σύζευξη μεταξύ γραμμής και γης και
- 2) Σύζευξη μεταξύ καλύμματος και γης.

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής η μεταφορά δεδομένων μεταξύ του ελεγκτή του συστήματος κλίσης και του ηλεκτρονικού υπολογιστή προβάλλονταν σε οθόνη.

∅ *Αποτελέσματα δοκιμής* : Η σωστή λειτουργία του ολοκληρωμένου συστήματος ελέγχου κλίσης μπορούσε επιτυχώς να επαληθευτεί κατά τη διάρκεια αλλά και μετά το τέλος των δοκιμών. Καμία διακοπή δεδομένων ή κάποια άλλη φθορά δεν παρατηρήθηκε στο συνδεδεμένο σύστημα ελέγχου κλίσης.

4) *Δοκιμή Νο4* : Αντοχή προ-καλωδιωμένης μονάδας σύνδεσης τροφοδοτικού χαμηλής τάσης από ρεύματα κεραυνών.

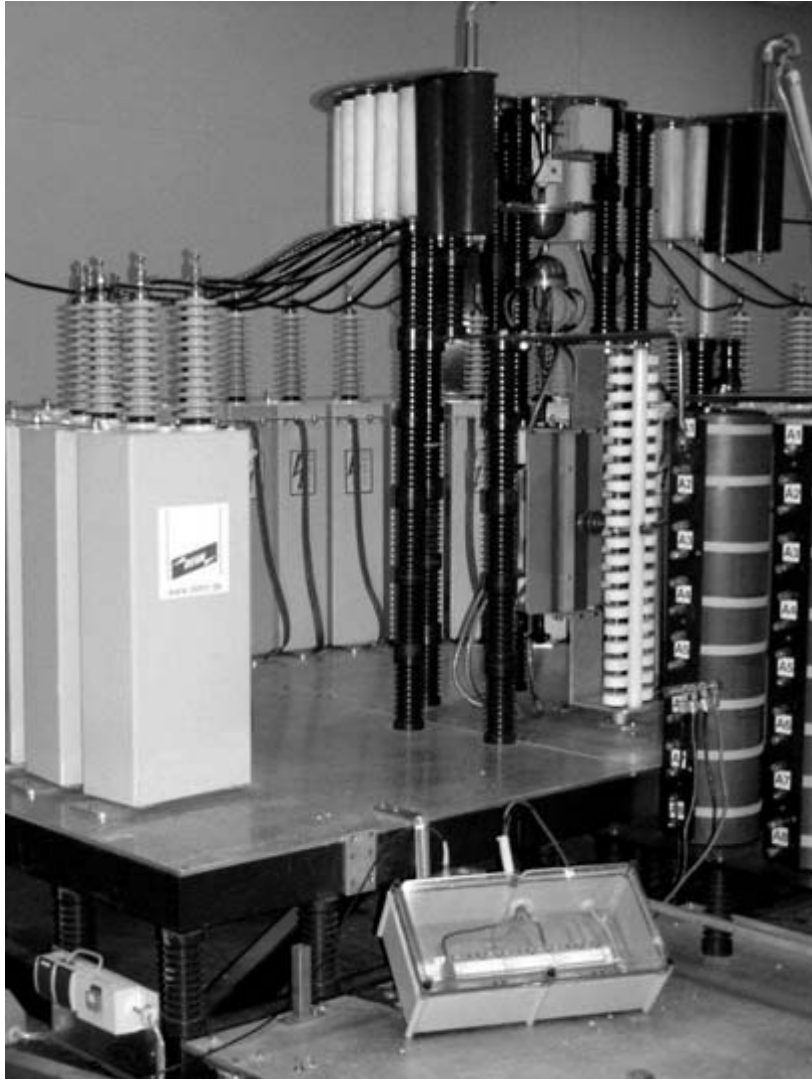
- Η βασική διαδικασία δοκιμής που χρησιμοποιήθηκε για αυτές τις έρευνες περιγράφεται στη τελευταία τροποποίηση του IEC 61643-1. Παρουσιάζεται ένα ολικό ρεύμα εκφόρτισης. Αυτή η δοκιμή χρησιμοποιείται για να ελέγχονται οι συσσωρευμένες επιδράσεις που εμφανίζονται όταν πολυπολικά SPD, που χρησιμοποιούνται για προστασία, άγουν την ίδια στιγμή. Η διανομή των παλμών ρεύματος και των χαρακτηριστικών παραμέτρων τους, όπως το ρεύμα κορυφής I_{peak} , ολικό φορτίο Q , και ειδική ενέργεια W/R φαίνονται στον πίνακα 4.2. Στο εργαστήριο αυτή η ισορροπημένη διανομή των παλμών ρεύματος εξασφαλίζεται από σειρές αντιστάσεων και αυτεπαγωγών. Θεωρώντας μια ισορροπημένη διανομή του ρεύματος υπερφόρτισης ανάμεσα στις γραμμές των φάσεων και του ουδέτερου, απεικονίζεται σε μια 'worst-case' ανάλυση. Διαφορετικές τεχνικές γείωσης σε διάφορα μέρη του κόσμου έχουν πολύ μεγάλη επιρροή πάνω στη διανομή του πραγματικού ρεύματος κεραυνού. Τα συστήματα προστασίας υπερφόρτισης που δοκιμάστηκαν κάτω από αυτές τις συνθήκες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε όλες τις εφαρμογές άσχετα από συγκεκριμένες καταστάσεις γείωσης των μεμονωμένων περιοχών. Στην εικόνα 4.10 φαίνεται η δοκιμή του ολικού φορτίου πάνω σε ένα προ-καλωδιωμένο SPD πρώτης κλάσης σχεδιασμένο για τη συγκεκριμένη εφαρμογή των ανεμογεννητριών. Επιπλέον, είναι πιθανόν ο εξοπλισμός που προστατεύεται να

συνδεθεί στους ακροδέκτες εξόδου της προστατευτικής μονάδας υπερφόρτισης. Αυτή η δοκιμή υπερβαίνει αρκετά τις τυποποιημένες απαιτήσεις. Ωστόσο προσφέρει στους χρήστες των SPDs μια απόδειξη για την ικανότητα που έχει το πραγματικό ρεύμα κεραυνού και την προστασία για τον εξοπλισμό που βρίσκεται προς την κάθοδο. [7]

TOLERANCES FOR PROPORTIONAL SURGE CURRENTS [6]

Test classification	Proportional currents and tolerances
Test class I	$I_{\text{peak}(1)} = I_{\text{peak}(2)} = I_{\text{peak}(N)} = I_{\text{peak}} / N \quad \pm 10 \%$ $Q_{(1)} = Q_{(2)} = Q_{(N)} = Q(I_{\text{Total}}) / N \quad \pm 20 \%$ $W/R_{(1)} = W/R_{(2)} = W/R_{(N)} = W/R(I_{\text{Total}})/N^2 \pm 35 \%$
Test class II	$I_{8/20(1)} = I_{8/20(2)} = I_{8/20(N)} = I_{\text{Total}} / N \quad \pm 10\%$

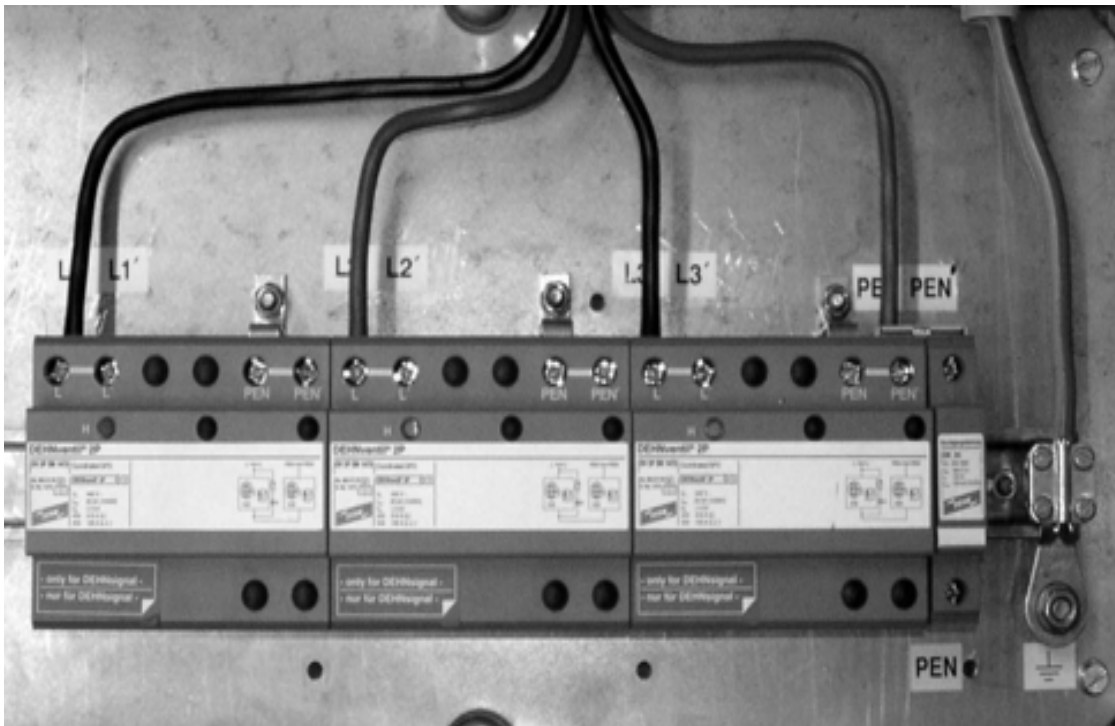
Πίνακας 4.2 : Ανοχές για συμμετρικά ρεύματα υπερφόρτισης.[8]



Εικόνα 4.10: Δοκιμή ολικού ρεύματος εκφόρτισης από αναστολείς κεραυνών. [8]

- *Επαλήθευση συνέχειας τροφοδότησης* : Η ανωτέρω βαθμίδα δοκιμής συγκεντρώνεται στα φορτία του κεραυνικού ρεύματος των συστημάτων. Επομένως τα SPDs και ο εξοπλισμός που συνδέθηκαν προς τη κάθοδο δοκιμάσθηκαν με μερικά ρεύματα κεραυνού, αλλά δεν συνδέθηκαν στο χαμηλής τάσης τροφοδοτικό κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Επίσης η απόδοση των συνδεδεμένων SPDs σε χαμηλής τάσης AC κυκλώματα ισχύος και κατά συνέπεια η αξιοπιστία του τροφοδοτικού γίνονται όλο και πιο σημαντικές για τον χρήστη. Άρα μια επιπρόσθετη βαθμίδα δοκιμής θα περιλαμβάνει την επιλεκτικότητα των εφεδρικών ασφαλειών και SPDs για τα παγκοσμίως 50 Hz. Η απόδειξη της αξιοπιστίας του τροφοδοτικού για την σχετική διευθέτηση του συστήματος, πραγματοποιήθηκε από το εργαστήριο χρησιμοποιώντας τη

βασική διαδικασία δοκιμής του ενός “κύκλου λειτουργίας” ,που περιγράφονται στα πρότυπα των SPDs, αλλά επιλέγοντας το πραγματικό στοιχείο προστασίας υπερέντασης, το ρεύμα θεωρητικού βραχυκυκλώματος και τη τάση του συστήματος για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Η συχνότητα των ρευμάτων που ακολουθούν και ο περιορισμός των ρευμάτων από τους αναστολείς παίζουν καθοριστικό ρόλο για ένα αξιόπιστο τροφοδοτικό του συστήματος. Στις εφαρμογές των ανεμογεννητριών το σύστημα του τροφοδοτικού μεταξύ της ανεμογεννήτριας και του μετασχηματιστή, το οποίο είναι τοποθετημένο στο κτίριο λειτουργίας συχνά σχεδιάζεται σαν ένα 400V/690V σύστημα. Στην εικόνα 4.11 φαίνεται ένας συντονισμένος και τοποθετημένος μέσα σε κάψα πρώτης κλάσης μηχανισμός διάκενου σπινθηρισμού, ειδικά για αυτό το υψηλό σύστημα.



Εικόνα 4.11: SPD μηχανισμός για την συγκεκριμένη εφαρμογή ανεμογεννητριών με ονομαστική τάση 690 V RMS [8]

Εφαρμόζοντας αυτούς τους σύγχρονους αναστολείς κεραυνικών ρευμάτων σε μια βάση διάκενου σπινθηρισμού, εξασφαλίζεται ότι χαμηλής ενέργειας υπερτάσεις καταστέλλονται σε ένα χαμηλό επίπεδο προστασίας χωρίς να οδηγούνται στους κύριους αγωγούς επακόλουθα ρεύματα. Οι παλμοί ρεύματος θα έπρεπε να

παρουσιάζονται με υψηλότερες ενέργειες και ίσως να οδηγούσαν επακόλουθα ρεύματα, τα οποία θα έπρεπε να είναι περιορισμένα ώστε να εξασφαλίζουν ότι ένα προστατευτικό στοιχείο αντίθετης υπερέντασης δεν θα αποκριθεί. [12] Πάρα πολλές εφαρμογές έχουν δείξει ότι ο περιορισμός του επακόλουθου ρεύματος από ένα SPD όπως περιγράφεται πιο πάνω αυξάνει την ασφάλεια του τροφοδοτικού για το ολοκληρωμένο σύστημα, το οποίο προστατεύεται από ένα τέτοιο αναστολέα. [8]

4.6 Φθορά λόγω ρεύματος κεραυνού στο κιβώτιο ταχυτήτων [1]

Πέρα από την προαναφερθείσα έρευνα που δείχνει ότι ένα μέρος του κεραυνικού ρεύματος θα διέλθει μέσα από το κιβώτιο ταχυτήτων, δεν υπάρχουν ακόμη διαθέσιμα στοιχεία για την φθορά λόγω κεραυνού στο κιβώτιο ταχυτήτων. Υπήρξαν περιπτώσεις όπου το κιβώτιο ταχυτήτων και τα αξονικά έδρανα κύλισης υπέστησαν ζημιά λόγω κτυπήματος κεραυνού στα πτερύγια της A/Γ. Παρόλα αυτά δεν έχει αποδειχθεί ακόμη αν αυτό είναι επακόλουθο της ζημιάς που υφίσταται το κύριο έδρανο κύλισης. Σε κάποιες περιπτώσεις, έχουν παρατηρηθεί κοιλώματα σε αποσυναρμολογημένα κιβώτια ταχυτήτων.

4.7 Ανεμόμετρο [13]

Τα ανεμόμετρα σε μια A/Γ χρησιμοποιούνται για να πραγματοποιούνται οι απαραίτητες μετρήσεις της ταχύτητας καθώς και της κατεύθυνσης του ανέμου. Τα ανεμόμετρα τοποθετούνται στην κορυφή της νασέλλας άρα είναι εκτεθειμένα. Η πιο συχνή αιτία καταστροφής του ανεμομέτρου είναι η πτώση κεραυνού. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα ηλεκτρονικά μέρη των οργάνων αυτών καταστρέφονται λόγω των επαγόμενων ρευμάτων. Σε κάποιες περιπτώσεις κρουστικά ρεύματα προκαλούν φθορές στο ανεμόμετρο όπως για παράδειγμα τήξη μεταλλικών μερών. Πλήγμα κεραυνού απευθείας στο ανεμόμετρο συντελεί στην καταστροφή όλων των μερών του, όμως τέτοιου είδους πλήγματα δεν συμβαίνουν τόσο συχνά.

4.8 Βλάβες στο ηλεκτρονικό σύστημα της ανεμογεννήτριας [14]

Κεραυνός είναι η γρήγορη ροή μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικού φορτίου. Αποτελέσματα της ροής αυτής, όπως η ασθενής ηλεκτρική και μαγνητική σύζευξη, η

ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, αποδεικνύονται ιδιαίτερα επιβλαβή για τα ηλεκτρονικά υποσυστήματα της ανεμογεννήτριας. Λόγω της πολύ μεγάλης τιμής του κεραυνικού ρεύματος, αναπτύσσονται εξίσου μεγάλες διαφορές δυναμικού κατά μήκος της διαδρομής του, οι οποίες με την σειρά τους δημιουργούν υπερτάσεις ικανές να προκαλέσουν βλάβες. Στον πίνακα 4.3 παρουσιάζονται τυπικές τιμές διάσπασης για τους ημιαγωγούς. Το ρεύμα του κεραυνού περικλείει μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Η ενέργεια αυτή είναι που προκαλεί βλάβες στα ηλεκτρονικά μέρη της ανεμογεννήτριας εξασφαλίζοντας πρόσβαση σε αυτά μέσω αγωγίμης ζεύξης και της σύζευξης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

ΤΥΠΟΣ	ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ (V)
CMOS	250-2000
MOSFET	10-200
JFET	140-10000
Δίοδοι SCHOTTKY, TTL	300-2500
Διπολικά Τρανζίστορ	300-7000

Πίνακας 4.3: Τάση διάσπασης ημιαγωγών [14]

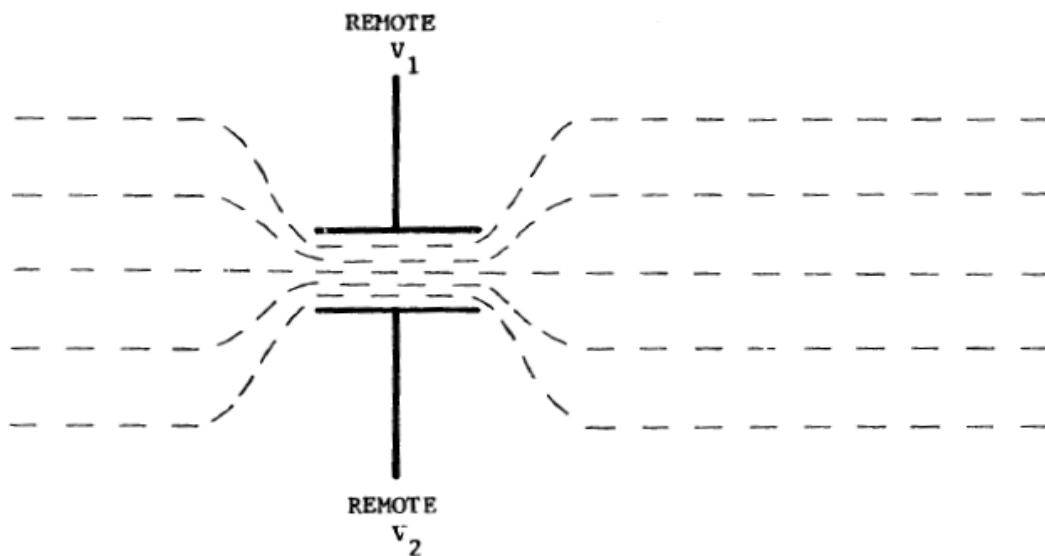
4.8.1 Αγωγήμη ζεύξη [14]

Η ενέργεια του ρεύματος του κεραυνού οδηγείται στα ηλεκτρονικά μέρη της ανεμογεννήτριας κυρίως μέσω εξωτερικών τηλεφωνικών γραμμών και γραμμών ισχύος, καθώς επίσης και μέσω τοπικών αισθητήρων και καλωδίων ελέγχου. Μέσω της αναπτυσσόμενης υπέρτασης, η ενέργεια διαδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις για σημαντική απόσταση. Έτσι ροή ενέργειας δεν εμφανίζεται μόνο μεταξύ ζευγών καλωδίων, αλλά παντού γύρω από τα ηλεκτρονικά στοιχεία, όπως από την είσοδο στην έξοδό τους, κατά μήκος της θωράκισης των καλωδίων ή της στέγασης του ηλεκτρονικού υποσυστήματος. Όπως είναι γνωστό η συνολική τάση σε έναν κλειστό βρόχο πρέπει να είναι ίση με μηδέν. Επομένως όταν το κεραυνικό ρεύμα περάσει από έναν βρόχο, δημιουργεί μία τάση και έτσι θα πρέπει σε κάποιο άλλο μέρος του βρόχου να εμφανιστεί μία ίση και αντίθετη τάση. Τέτοια φαινόμενα έχουν σαν αποτέλεσμα μεγάλες μεταβολές του δυναμικού του βρόχου, με συνέπεια οι τάσεις

των ηλεκτρονικών στοιχείων να φτάσουν σε μη αποδεκτά επίπεδα. Οι τάσεις βρόχων θα εξεταστούν αναλυτικότερα στην συνέχεια.

4.8.2 Σύζευξη ηλεκτρικού πεδίου [14]

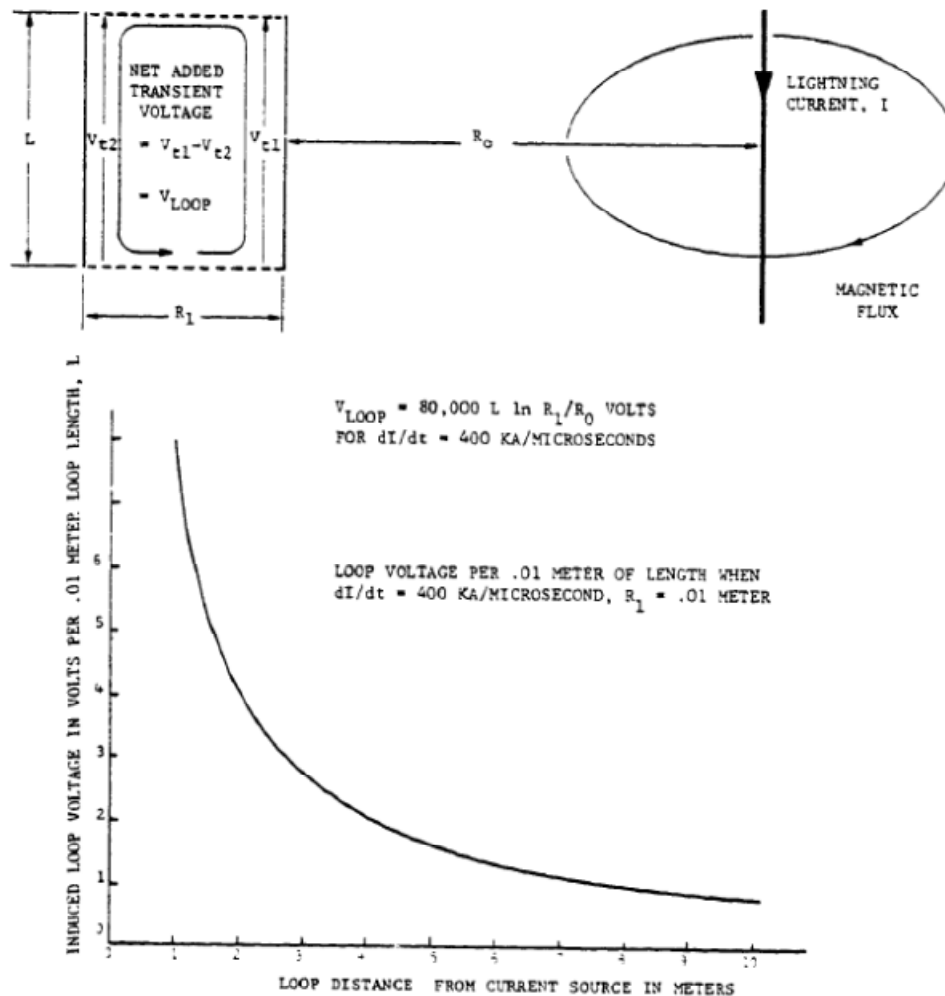
Κατά την διάρκεια της ροής του ρεύματος από το σημείο πλήγματος προς την γη, εμφανίζονται μεγάλες τιμές ηλεκτρικού πεδίου (της τάξης των 8000 V/cm), στο εσωτερικό της κατασκευής. Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα και τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά στοιχεία δεν μπορούν να αντέξουν αυτές τις τιμές. Όμως τα πράγματα μπορούν να γίνουν ακόμη χειρότερα. Δύο αγωγοί διαχωρισμένοι διηλεκτρικά, έχουν κάποια χωρητικότητα ανάμεσά τους. Αν σχηματιστούν από δύο διαφορετικά δυναμικά στις δύο πλευρές αυτού του πυκνωτή, διαδρομές χαμηλής αντίστασης, τότε η τιμή του πεδίου στο διηλεκτρικό θα αυξηθεί ακόμη περισσότερο προκαλώντας την διάσπασή του. Αν η μία πλευρά του πυκνωτή βρίσκεται σχεδόν στο δυναμικό του εδάφους και η άλλη σε δυναμικό πολλών kV/m, τότε η διηλεκτρική διάσπαση είναι σίγουρη (Εικόνα 4.12).



Εικόνα 4.12: Αύξηση τιμής ηλεκτρικού πεδίου (V_1-V_2 ανά μέτρο) ενός πυκνωτή κατά την διαρροή του από ρεύμα κεραυνού. [14]

4.8.3 Σύζευξη μαγνητικού πεδίου [14]

Το ρεύμα του κεραυνού προκαλεί την δημιουργία μαγνητικής ροής, η οποία εμπλέκεται με όλα τα καλώδια που είναι κοντά στην διαδρομή ροής του. Καθώς λοιπόν η τιμή του ρεύματος αυξάνεται, η εμπλεκόμενη με τα καλώδια μαγνητική ροή αυξάνεται, επάγοντας σε αυτά μία τάση. Όταν το ρεύμα ρέει κάθετα προς τα καλώδια τότε η επαγόμενη τάση είναι μηδενική, ενώ όταν ρέει παράλληλα προς αυτά η επαγόμενη τάση γίνεται μέγιστη. Ακόμη επαγόμενη τάση μπορεί να εμφανιστεί σε τμήματα κλειστού βρόχου ή και σε ολόκληρο τον βρόχο. Στην εικόνα 4.13 δύο καλώδια που απέχουν απόσταση 1 cm μεταξύ τους, βρίσκονται παράλληλα και σε απόσταση 1 m από την διαδρομή του ρεύματος του κεραυνού που μεταβάλλεται κατά 400 kA/μs. Στην εικόνα φαίνεται επίσης η κυματομορφή της επαγόμενης τάσης ανά εκατοστό μήκους βρόχου σαν συνάρτηση της απόστασης του βρόχου από την πηγή του ρεύματος. Έτσι όταν πέφτει κεραυνός κοντά στον πύργο της ανεμογεννήτριας, χωρίς όμως να πλήττει την κατασκευή, δημιουργούνται ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία στα ηλεκτρονικά μέρη της ανεμογεννήτριας. Συνήθως οι αποστάσεις μεταξύ του σημείου πλήγματος και των ηλεκτρονικών στοιχείων είναι αρκετά μεγάλες. Αυτό σημαίνει ότι οι επαγόμενες τάσεις είναι σημαντικές μόνο όταν στα ηλεκτρονικά στοιχεία συνδέονται μεγάλα μεταλλικά καλώδια όπως αυτά που οδηγούν αισθητήρες ή όργανα ελέγχου. Οι τηλεφωνικές γραμμές και οι γραμμές ισχύος έχουν αξιοσημείωτα μήκη, ωστόσο συνήθως είναι κάθετα στην ροή του ρεύματος κι έτσι δεν επάγεται τάση.



Εικόνα 4.13: Τάση που επάγεται σε παράλληλο αγώγιμο βρόγχο από ρεύμα κεραυνού και η κυματομορφή της. [14]

4.9 Επαγόμενες Τάσεις [14]

Μία από τις σημαντικότερες επιπτώσεις του πλήγματος κεραυνού είναι η δημιουργία επαγόμενων τάσεων και υπερτάσεων από τις οποίες πλήττονται κυρίως το σύστημα ελέγχου και τα ηλεκτρονικά μέρη της ανεμογεννήτριας. Μάλιστα βλάβες σε αυτά τα συστήματα εμφανίζονται συχνά και αποτελούν βασική αιτία για να τεθεί εκτός λειτουργίας η ανεμογεννήτρια. Κύματα τάσεων μπορούν να προκληθούν τόσο από άμεσο πλήγμα κεραυνού (στην ίδια την ανεμογεννήτρια), όσο και από έμμεσο (σε εξωτερικά συστήματα ισχύος, σε γειτονική ανεμογεννήτρια, ή σε σημείο του εδάφους κοντά στην ανεμογεννήτρια). Μία πτώση κεραυνού κοντά στην ανεμογεννήτρια, προκαλεί υπερτάσεις σε εισερχόμενα σήματα, στις τηλεφωνικές γραμμές και στις

γραμμές ισχύος. Το μέγεθος των υπερτάσεων μπορεί να είναι κάποιες δεκάδες kV. Αν ο κεραυνός χτυπήσει μια γειτονική ανεμογεννήτρια, τότε οι υπερτάσεις έχουν τουλάχιστον το προαναφερθέν μέγεθος, το οποίο όμως εξαρτάται εν μέρει από το πόσο αποτελεσματικό είναι το σύστημα γείωσης της πληγείσας ανεμογεννήτριας. Ωστόσο επαρκής προστασία απέναντι σε άμεσο πλήγμα, που είναι και η χειρότερη περίπτωση, καλύπτει και την πιθανότητα των έμμεσων χτυπημάτων.

Ουσιαστικά οι επαγόμενες τάσεις οφείλονται στο μαγνητικό πεδίο, που δημιουργεί το ρεύμα του κεραυνού καθώς διαρρέει την ανεμογεννήτρια και είναι μια συνάρτηση της γεωμετρίας της διαδρομής αυτής. Το ρεύμα οδηγείται στο έδαφος ακολουθώντας την πιο σύντομη διαδρομή με την μικρότερη αυτεπαγωγή. Πιθανές διαδρομές είναι ο μεταλλικός σκελετός της κατασκευής και φυσικά τα καλώδια. Η αυτεπαγωγή ανά μονάδα μήκους του πύργου δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$L = 0.2 * \ln(1000/r) \text{ [}\mu\text{H/m]}$$

όπου r είναι η μέση ακτίνα του πύργου (ή του αγωγού καθόδου) σε μέτρα. Με τέτοια αγωγιμότητα η αντίσταση του πύργου μπορεί να αμεληθεί, έτσι ώστε η τάση ανά μονάδα μήκους να δίνεται από την σχέση:

$$V = L di/dt$$

Όπου L είναι η αυτεπαγωγή που υπολογίστηκε προηγουμένως και i το ρεύμα του κεραυνού.

Για τους πύργους που είναι κατασκευασμένοι εξ' ολοκλήρου από μέταλλο, η αυτεπαγωγή ανά μονάδα μήκους εξαρτάται από την διάμετρό τους. Για παράδειγμα για διάμετρο μεταξύ 3 και 12 μέτρων, παράγεται αυτεπαγωγή μεταξύ 1 και 1.3 $\mu\text{H/m}$. Για μεταβολή της κλίσης του κεραυνικού ρεύματος από 10 kA/ μs έως 200 kA/ μs , η κορυφή του ηλεκτρικού πεδίου στον πύργο κυμαίνεται από 10 kV/m έως 460 kV/m. Έτσι σε έναν πύργο ύψους 100 μέτρων μπορεί να εμφανιστούν τάσεις με τιμή κορυφής μέχρι και 46 MV. Προφανώς μεγάλες τιμές πεδίου μπορούν να

προκαλέσουν καταστροφή των μονώσεων, ανάφλεξη και δημιουργία ηλεκτρικού τόξου. [14]

Συνήθως το μεγαλύτερο μέρος του κεραυνικού ρεύματος ρέει μέσω του εξωτερικού μέρους της ίδιας της κατασκευής, μειώνοντας έτσι τις τιμές των πεδίων στο εσωτερικό της. Αν ο κατασκευαστής δεν έχει μεριμνήσει για τα παραπάνω, τότε μεγάλο μέρος του ρεύματος περνάει μέσα από τα καλώδια με κίνδυνο καταστροφής της μόνωσης τους. Μάλιστα πειράματα έχουν δείξει ότι καλώδια μικρού μεγέθους μπορεί να εκραγούν όταν διαρρέονται από ρεύμα μεγαλύτερο των 100 kA.

Το σύστημα ελέγχου και το σύστημα της γεννήτριας αποτελούνται από ένα σύνολο οργάνων μετρήσεων και ελέγχου που συνδέονται μεταξύ τους μέσω καλωδίων. Όταν η ανεμογεννήτρια πλήττεται από κεραυνό υπάρχουν οι εξής κίνδυνοι:

- Να καταστραφεί η μόνωση κάποιου οργάνου ή συσκευής οπότε αν κάποιο μέλος του προσωπικού έρθει σε επαφή με αυτό, εμφανίζεται τάση επαφής.
- Να μην υπάρχει επαρκής μόνωση του πατώματος με συνέπεια να υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης βηματικής τάσης.
- Τα καλώδια να σχηματίσουν κλειστούς βρόχους με αποτέλεσμα να εμφανιστούν τάσεις βρόχων.

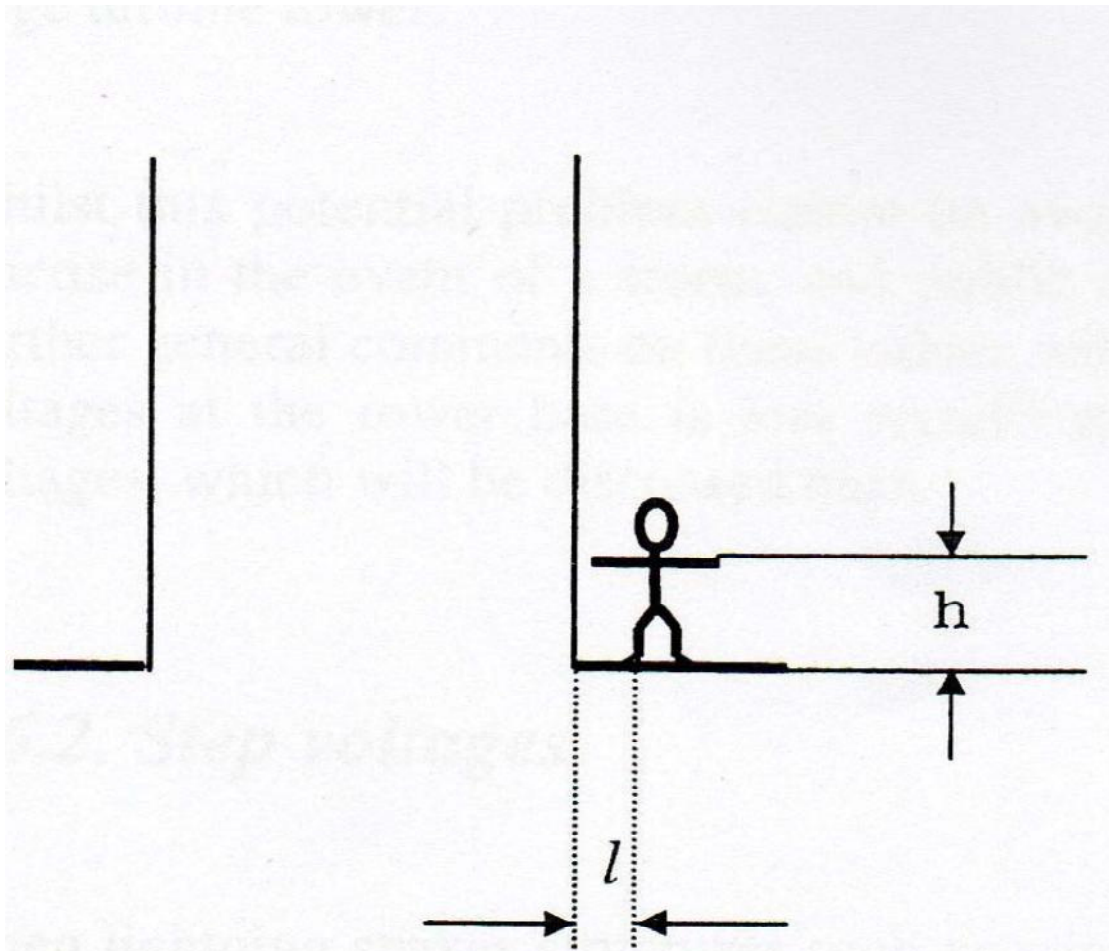
Παρακάτω εξετάζεται ξεχωριστά η κάθε μία από τις προαναφερθείσες τάσεις καθώς επίσης και οι υπερτάσεις που μπορεί να προκαλέσει το ρεύμα του κεραυνού.

4.9.1 Τάση επαφής [14]

Αν αγγίξει κάποιος ένα οποιοδήποτε αγώγιμο τμήμα της κατασκευής κατά την διάρκεια κεραυνικού πλήγματος, θα δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού μεταξύ των ποδιών του και του σημείου επαφής. Αυτή είναι η λεγόμενη τάση επαφής. Αν η μόνωση μεταξύ των ποδιών του και του αγώγιμου τμήματος δεν είναι αρκετή ώστε να αποτρέψει τον σχηματισμό τόξου, τότε ένα ρεύμα θα ρεύσει από το σημείο επαφής προς τα πόδια. Το μέγεθος των τάσεων επαφής μπορεί να εκτιμηθεί εύκολα. Θεωρώντας d την διάμετρο της βάσης του πύργου, i το ρεύμα του κεραυνού, το στιγμιαίο μαγνητικό πεδίο γύρω από τον πύργο θα είναι:

$$H = i/(\pi d)$$

και για έναν άνθρωπο που ακουμπάει το ένα χέρι του στον πύργο, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.14, η στιγμιαία επαγόμενη τάση θα είναι:



Εικόνα 4.14: Εκτίμηση τάσεων επαφής [14]

$$V = (d\phi)/(dt)$$

$$\phi = \mu H A$$

$$\phi = \mu * [i/(\pi d)] * l * h$$

$$\text{Άρα } V = [(di)/(dt)] * [(4 * 10^{-7})/d] * l * h$$

Όπου

H: η ένταση του μαγνητικού πεδίου

V: η τάση επαφής

ϕ : η μαγνητική ροή

l : η απόσταση των ποδιών από τον πύργο (απόσταση επαφής)

h: το ύψος από το έδαφος μέχρι τους ώμους (ύψος επαφής)

Για παράδειγμα λαμβάνοντας $d = 3 \text{ m}$, $l = 1 \text{ m}$, $h = 1.5 \text{ m}$, θα έχουμε $V = 2 \text{ kV}$ (για $10 \text{ kA}/\mu\text{s}$) και $V = 40 \text{ kV}$ (για $200 \text{ kA}/\mu\text{s}$).

Η κυματομορφή μιας επαγόμενης τάσης ακολουθεί την παράγωγο του ρεύματος του κεραυνού, για αυτό είναι σχετικά μικρής διάρκειας και έχει τριγωνική μορφή.

4.9.2 Βηματική τάση [14], [15]

Όταν ο κεραυνός πλήξει την ανεμογεννήτρια, το ρεύμα ρέει έξω από την βάση του πύργου, στην επιφάνεια ή κοντά στην επιφάνεια του εδάφους εξουδετερώνοντας έτσι τα φορτία που είχαν δημιουργηθεί σε αυτό από το φορτισμένο σύννεφο που υπήρχε από πάνω (αν και ένα μέρος του ρεύματος θα περάσει μέσα από τις μεταλλικές ταινίες γείωσης, αν έχουν εγκατασταθεί). Το χώμα είναι ένα μέσο υψηλής αντίστασης, έτσι μεγάλες ποσότητες δυναμικού θα υπάρχουν στην επιφάνειά του. Όταν λοιπόν ένα άτομο σταθεί στο έδαφος κοντά στον πύργο, που πλήττεται άμεσα ή έμμεσα από κεραυνό, θα αναπτυχθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα πόδια του, που ονομάζεται βηματική τάση. Η βηματική τάση είναι συχνή αιτία θανάτου και υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V_{step} = \frac{i \cdot \rho \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot d \cdot (d+s)} \quad [14]$$

όπου:

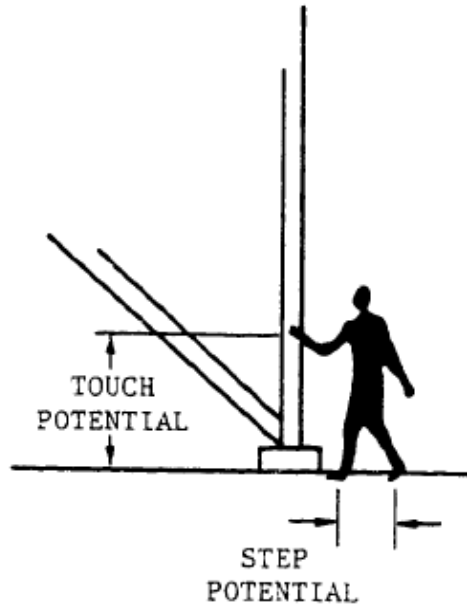
i : το εύρος του ρεύματος του κεραυνού [A]

ρ : η ειδική αντίσταση του εδάφους [Ωm]

d : η απόσταση του ατόμου από τον πύργο

s : η απόσταση μεταξύ των ποδιών

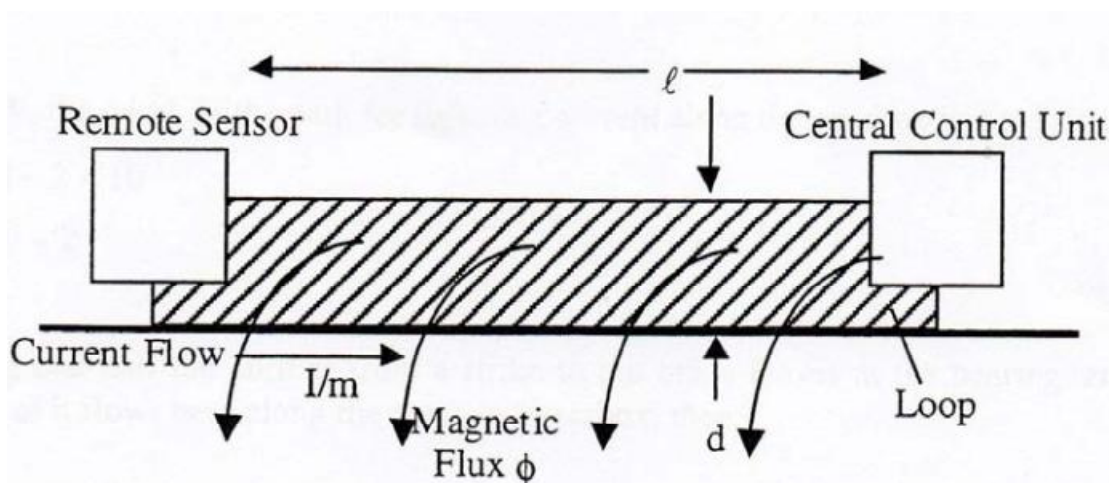
Η βηματική τάση μειώνεται με την αύξηση της απόστασης d , ενώ αυξάνεται με την αύξηση της απόστασης βήματος s . Στην εικόνα 4.15 φαίνονται η βηματική τάση και η τάση επαφής. [15]



Εικόνα 4.15: Τάση επαφής και βηματική τάση [15]

4.9.3 Τάσεις βρόχων καλωδίων [15]

Ένα στοιχείο που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής σε μια εγκατάσταση είναι η διαδρομή των καλωδίων. Είναι σημαντικό τα καλώδια να μην σχηματίζουν κλειστούς βρόχους. Όταν συμβαίνει αυτό, η αύξηση της μεταβολής της μαγνητικής ροής από το ρεύμα του κεραυνού, παράγει μία τάση στον βρόχο. Η τάση αυτή εμφανίζεται στο σημείο του βρόχου με την υψηλότερη σύνθετη αντίσταση που είναι συνήθως ένα από τα δύο σημεία τερματισμού του καλωδίου. Για τον υπολογισμό της τάσης θα χρησιμοποιήσουμε την διάταξη της εικόνας 4.16.



Εικόνα 4.16: Επαγόμενη τάση βρόχου [15]

Θεωρώντας d την απόσταση από το καλώδιο στην επιφάνεια και ℓ το μήκος του καλωδίου, η επαγόμενη τάση δίνεται από την γνωστή σχέση:

$$V = (d\phi)/(dt) \quad (1)$$

όπου:

$$\phi = \mu H A, \text{ η μαγνητική ροή}$$

$$A = d \cdot \ell, \text{ το εμβαδό του βρόχου}$$

Όμως το H είναι ισοδύναμο με την πυκνότητα του ρεύματος J , δηλαδή $H = J = I/W$, όπου W είναι το πλάτος της επιφάνειας της διαδρομής κατά μήκος της οποίας εμφανίζεται το ρεύμα. Έτσι η (1) γίνεται:

$$V = \mu A \cdot (dJ)/(dt) = (\mu A/W) \cdot (dI)/(dt) \quad [15]$$

Για παράδειγμα για καλώδιο που οδεύει 2 μέτρα κατά μήκος του κιβωτίου ταχυτήτων της ανεμογεννήτριας με 1.5 μέτρο διάμετρο και σε απόσταση 2 εκατοστά από την επιφάνειά του τότε:

$$W = 1.5 \cdot \pi = 4.5 \text{ [m]}$$

$$d = 2 \cdot 10^{-2} \text{ [m]}$$

$$\ell = 2 \text{ [m]}$$

$$(dI)/(dt) = 2 \cdot 10^{11} \text{ [A/s]}$$

$$\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ [H/m]}$$

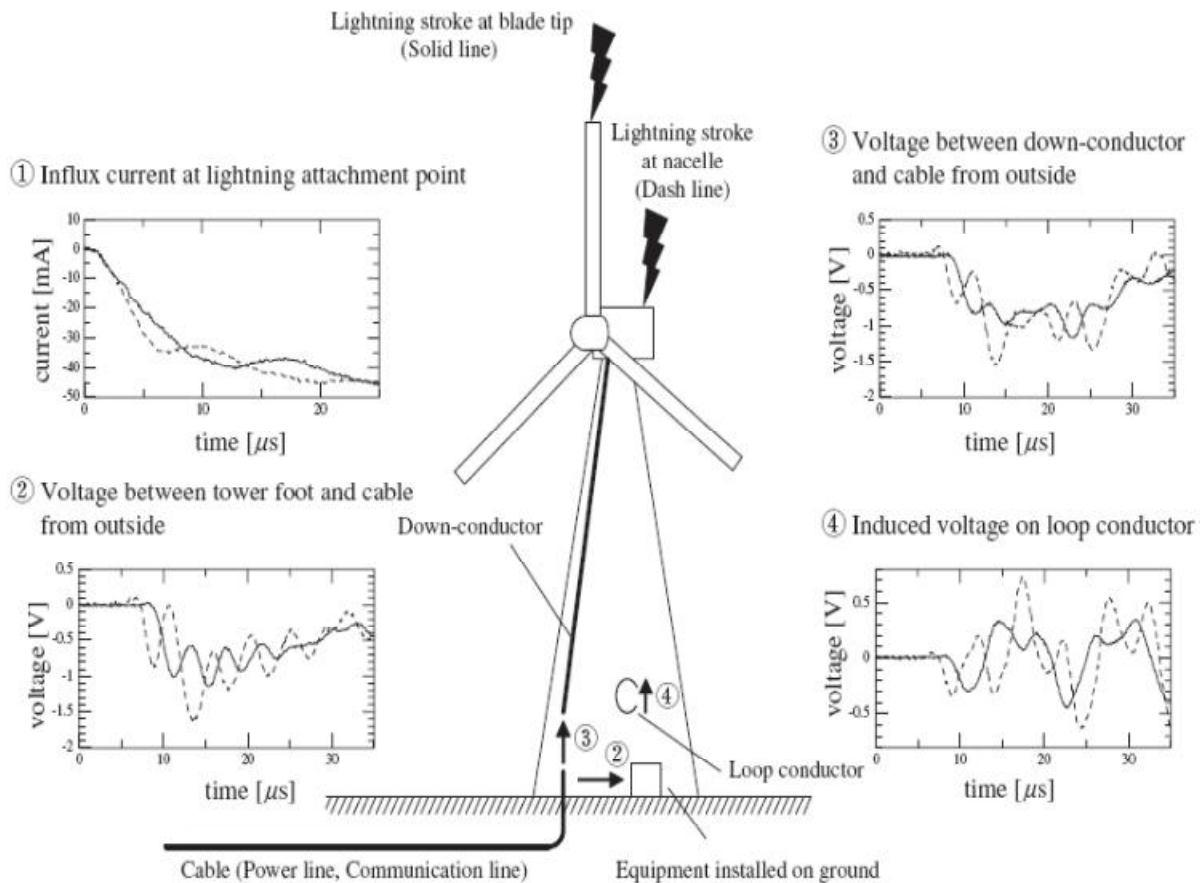
Υποθέτοντας ότι το μισό ρεύμα του κεραυνού που έπληξε το πτερύγιο οδηγείται στο ρουλεμάν, άρα μόνο το άλλο μισό διαρρέει τον άξονα και το κιβώτιο τότε:

$$V = (0.5 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 2 \cdot 10^{11}) / 4.5 = 1117 \text{ V} \quad [15]$$

4.9.4 Υπερτάσεις [16],[17]

Όπως θα δούμε στο κεφάλαιο της γείωσης, η τιμή της αντίστασης γείωσης επιλέγεται μικρή, έτσι ώστε να μειωθούν οι βηματικές τάσεις και οι τάσεις επαφής. Λόγω αυτής της μικρής τιμής προκαλείται μία αύξηση της τάσης στην βάση του πύργου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην βάση του πύργου και στους εισερχόμενους αγωγούς. Αυτή η διαφορά δυναμικού γίνεται υπέρταση μεταξύ της γραμμής ισχύος και του μετασχηματιστή, που είναι εγκατεστημένος στο επίπεδο του εδάφους μέσα στον πύργο ή μεταξύ μιας γραμμής τηλεπικοινωνιών και μιας συσκευής τηλεπικοινωνιών. Αντίστοιχη διαφορά δυναμικού, που οδηγεί σε υπέρταση, μπορεί να εμφανιστεί και μεταξύ του κατώτερου τμήματος των αγωγών καθόδου που είναι εγκατεστημένοι μέσα στον πύργο και του εισερχόμενου αγωγού. [16], [17]

Στην εικόνα 4.17 ο κεραυνός πλήττει την άκρη του πτερυγίου ή την νασέλλα. Απεικονίζονται οι κυματομορφές του ρεύματος στο σημείο πλήγματος, η διαφορά τάσης μεταξύ της βάσης του πύργου και του εισερχόμενου αγωγού, η διαφορά τάσης μεταξύ του αγωγού καθόδου και του εισερχόμενου αγωγού και η επαγόμενη τάση σε έναν αγωγό που σχηματίζει βρόχο. Με συνεχή γραμμή απεικονίζονται οι κυματομορφές για την περίπτωση που ο κεραυνός πλήττει το άκρο του πτερυγίου και με διακεκομμένη για την περίπτωση πλήγματος κεραυνού στην νασέλλα. [17]



Εικόνα 4.17: Παραγόμενη υπέρταση μεταξύ αγωγού καθόδου και εισερχόμενου καλωδίου [17]

4.10 Στατιστικά βλαβών [18]

Κατά την διάρκεια καταιγίδας μία ανεμογεννήτρια είναι πιθανό να χτυπηθεί από κεραυνό και να υποστεί σοβαρές βλάβες. Τα μέρη της ανεμογεννήτριας που είναι πιο πιθανό να δεχτούν το πλήγμα, το κόστος επισκευής τους και ο χρόνος κατά τον οποίο η ανεμογεννήτρια παραμένει εκτός λειτουργίας, παρουσιάζονται στην συνέχεια με την μορφή διαγραμμάτων και πινάκων.

4.10.1 Βλάβες [18]

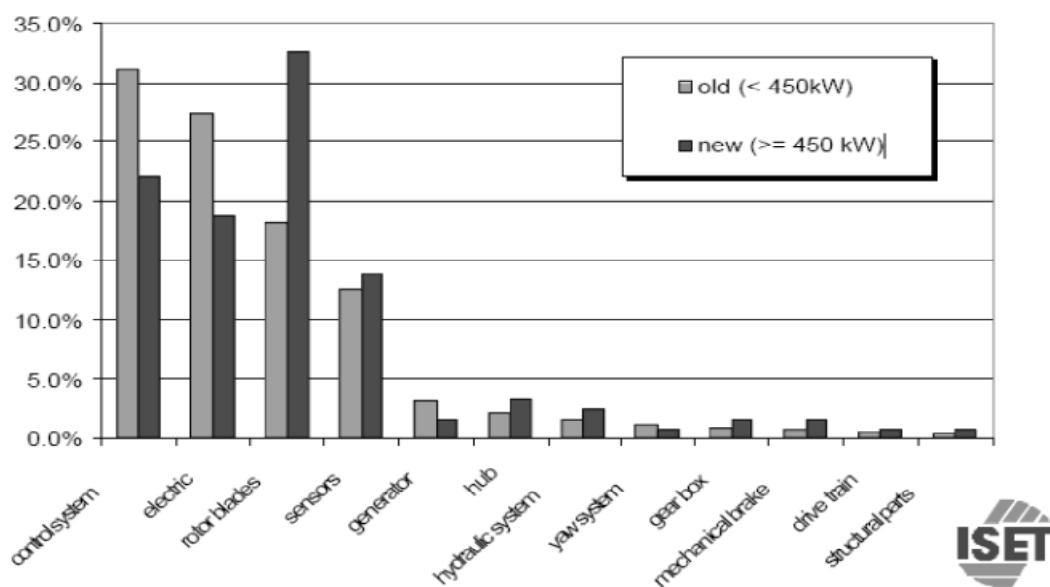
Από έρευνες έχουν προκύψει τα ακόλουθα χρήσιμα συμπεράσματα:

- Σε 11,394 χρόνια λειτουργίας έχουν αναφερθεί συνολικά 914 βλάβες από πλήγμα κεραυνού, που αντιστοιχεί σε 8 συμβάντα ανά 100 χρόνια ανεμογεννήτριας. Οι βάσεις δεδομένων της Δανίας και της Σουηδίας κάνουν λόγο για 3.9 και 5.8 συμβάντα ανά 100 χρόνια ανεμογεννήτριας αντίστοιχα.
- Περίπου το 25% των βλαβών προκλήθηκε από άμεσο πλήγμα κεραυνού. Οι υπόλοιπες βλάβες προκλήθηκαν από έμμεσα πλήγματα, όπως για παράδειγμα πλήγμα στο ηλεκτρικό δίκτυο.
- Ο μέσος χρόνος διακοπής είναι 30 ώρες ανά βλάβη.
- Τα περύγια είναι τα πιο ευάλωτα μέρη. Εμφανίζουν την υψηλότερη συχνότητα κεραυνικού πλήγματος, το υψηλότερο κόστος επισκευής (περίπου 20,000 € ανά συμβάν, για γεννήτριες άνω των 450 kW) και τον μεγαλύτερο χρόνο διακοπής (περίπου 10 ημέρες ανά συμβάν).
- Οι μεγαλύτερες και πιο σύγχρονες ανεμογεννήτριες εμφανίζουν λιγότερες βλάβες στο σύστημα ελέγχου.

Σύμφωνα με στοιχεία της βάσης δεδομένων του ISET (International Solar Electric Technology) , κατά την περίοδο 1991-1998, που αντιστοιχεί περίπου σε 9200 χρόνια ανεμογεννήτριας, 739 ανεμογεννήτριες υπέστησαν βλάβες από πλήγμα κεραυνού. Ωστόσο αναφέρθηκαν 1032 βλάβες, που σημαίνει ότι ένα κεραυνικό πλήγμα μπορεί να προκαλέσει βλάβη σε περισσότερα από ένα στοιχεία της ανεμογεννήτριας. Στον πίνακα 4.4 και στο διάγραμμα 4.1 παρουσιάζονται αναλυτικά τα στοιχεία αυτά.[18]

Στοιχεία	Παλιές (<450 kW)		Καινούριες (>=450 kW)		Σύνολο	
	Αριθμός σφαλμάτων	%	Αριθμός σφαλμάτων	%	Αριθμός σφαλμάτων	%
Σύστημα ελέγχου	283	31.1	27	22	310	30
Ηλεκτρικό σύστημα	248	27.3	23	18.7	271	26.3
Πτερύγια	165	18.2	40	32.5	205	19.9
Αισθητήρες	115	12.7	17	13.8	132	12.8
Γεννήτρια	29	3.2	2	1.6	31	3.0
Πλήμνη	19	2.1	4	3.3	23	2.2
Υδραυλικό σύστημα	15	1.7	3	2.4	18	1.7
Σύστημα παρέκκλισης	11	1.2	1	0.8	12	1.2
Κιβώτιο ταχυτήτων	8	0.9	2	1.6	10	1.0
Μηχανικό φρένο	7	0.8	2	1.6	9	0.9
Σύστημα οδήγησης	5	0.6	1	0.8	6	0.6
Δομικά μέρη	4	0.4	1	0.8	5	0.5
Σύνολο	909	100	123	100	1032	100

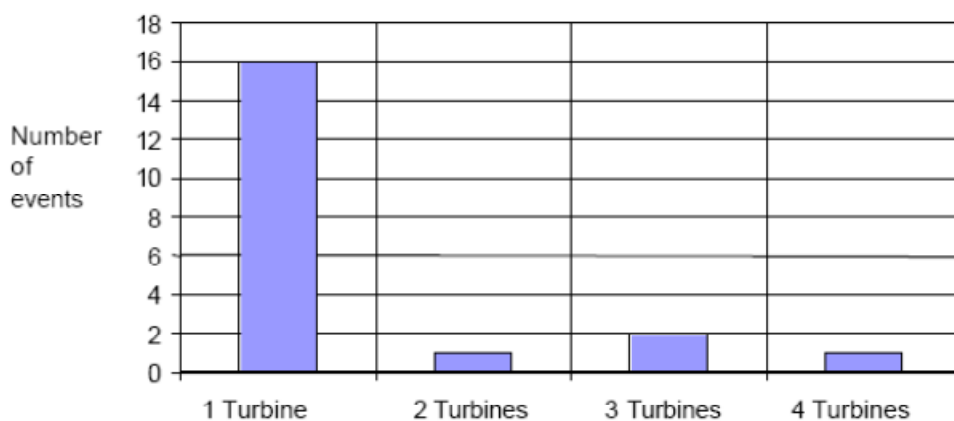
Πίνακας 4.4 : Σφάλματα επιμέρους στοιχείων Α/Γ [18]



Διάγραμμα 4.1 : Κατανομή σφαλμάτων [18]

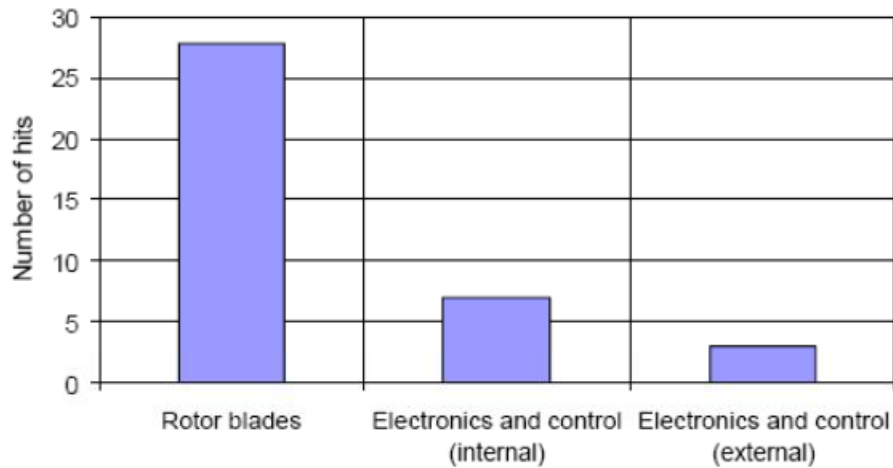
Ωστόσο τα στοιχεία από την βάση δεδομένων του ISET αναφέρονται σε συνολικό αριθμό βλαβών κατά την διάρκεια μίας περιόδου, ενώ δεν δίνουν καμία πληροφορία για τον αντίστοιχο αριθμό ανά καταιγίδα. Για τον λόγο αυτόν στα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζονται τα στοιχεία από 20 αναφορές για βλάβες από πλήγματα κεραυνού που έγιναν στην Ολλανδία.

Το διάγραμμα 4.2 δείχνει τον αριθμό των γεννητριών που χτυπήθηκαν κατά την διάρκεια μίας καταιγίδας. Όπως παρατηρούμε 16 φορές χτυπήθηκε μία ανεμογεννήτρια από μία φορά χτυπήθηκαν 2 και 4 ανεμογεννήτριες και 2 φορές χτυπήθηκαν 3. Δηλαδή σε 20 συνολικά συμβάντα χτυπήθηκαν 28 ανεμογεννήτριες, που σημαίνει ότι περισσότερες από μία ανεμογεννήτριες μπορεί να πληγούν κατά την διάρκεια μίας καταιγίδας.



Διάγραμμα 4.2: Γεννήτριες που επλήγησαν κατά την διάρκεια μιας καταιγίδας [18]

Το διάγραμμα 4.3 δείχνει τα στοιχεία της ανεμογεννήτριας που υπέστησαν βλάβες. Σε σύνολο 38 πληγμάτων το 75% προκάλεσε βλάβες στα πτερύγια, που όπως αναφέρθηκε και στην αρχή της παραγράφου είναι το πιο ευάλωτο τμήμα της ανεμογεννήτριας. Από αυτό το ποσοστό το 55% προκάλεσε ολοκληρωτική καταστροφή των πτερυγίων οδηγώντας στην αντικατάστασή τους, ενώ το 45% των βλαβών μπορούσαν να επιδιορθωθούν. Τέλος ένα ποσοστό περίπου 25% προκάλεσε βλάβες στο ηλεκτρονικό σύστημα και στο σύστημα ελέγχου (15% εσωτερικά και 10% εξωτερικά).



Διάγραμμα 4.3 : Κατανομή σφαλμάτων [18]

4.10.2 Κόστος

Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων σχετικά με το κόστος των βλαβών που προκαλούνται σε μία ανεμογεννήτρια από πλήγμα κεραυνού, διεξήχθη μία έρευνα σε ανεμογεννήτριες στην περιοχή της Βόρειας Θάλασσας. Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν τρεις τοποθεσίες:

- 12 km από την ακτή, NS1 (Near Shore 1)
- 30 km από την ακτή, NS2
- 300 km από την Ολλανδική ακτή στο Doggerbank, FO (Far Offshore)

Τα χαρακτηριστικά των αιολικών πάρκων που χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη δίνονται στον ακόλουθο πίνακα (πίνακας 4.5). Λόγω των διαφορών στην συχνότητα των κεραυνικών πληγμάτων για τις διαφορετικές περιοχές και του διαφορετικού προσανατολισμού των αιολικών πάρκων, το μέγεθος της βλάβης μπορεί να διαφέρει. Ως εκ τούτου ο αριθμός των διακοπών των ανεμογεννητριών και κατ' επέκταση οι δαπάνες επιθεώρησης και επισκευής, θα διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή ακόμη και για ίδια αιολικά πάρκα.

Όνομα αιολικού πάρκου	WF_1.5	WF_3.0	WF_6.0
Αριθμός ανεμογεννητριών	67	34	17
Εκτιμώμενη ισχύς κάθε ανεμογεννήτριας[MW]	1.5	3.0	6.0
Διάμετρος στροφέα[m]	70	90	120
Ύψος νασέλλας πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας[m]	55	70	80
Μέγιστο ύψος πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας[m]	90	115	140
Διάταξη ανεμογεννητριών (σε σειρές)	10	5	3
Απόσταση μεταξύ ανεμογεννητριών[m]	400	500	650
Απόσταση μεταξύ σειρών[m]	550	700	900
Μέγεθος[km x km]	3.6 x 3.3	3.0 x 2.8	3.25 x 1.8
Επιφάνεια συλλογής[km ²]	13.1	10.8	8.4

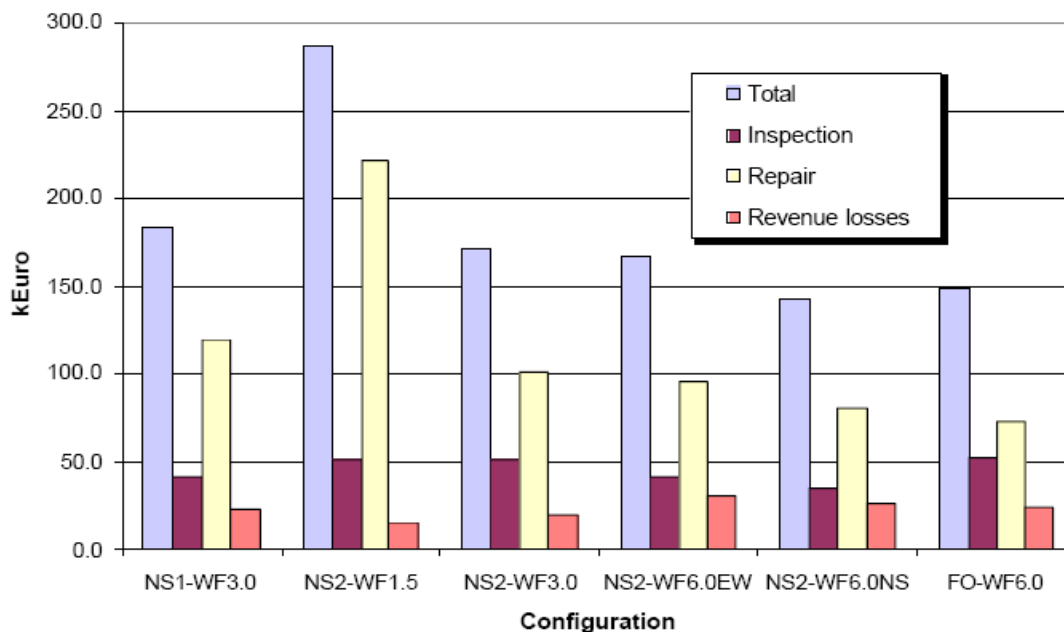
Πίνακας 4.5 : Αιολικά πάρκα που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη [18]

Μία άλλη πτυχή που προκαλεί διαφορές στις ετήσιες δαπάνες, είναι ο εξοπλισμός που απαιτείται για την επιθεώρηση και την επισκευή. Για παράδειγμα όταν ένα αιολικό πάρκο βρίσκεται μακριά από την ακτή, οι ετήσιες δαπάνες επηρεάζονται κατά δύο τρόπους. Κατ' αρχάς λόγω του μεγαλύτερου χρόνου μεταφοράς (λόγω της μεγάλης απόστασης), ο συνολικός χρόνος διακοπής θα είναι μεγαλύτερος και οι απώλειες εσόδων υψηλότερες. Δεύτερον, ανάλογα με την σύμβαση (μίσθωση ανά ώρα ή μίσθωση ανά ημέρα), η τιμή του εξοπλισμού μπορεί να αυξηθεί, επειδή χρειάζεται για μεγαλύτερο διάστημα. Επιπλέον ο τύπος της ανεμογεννήτριας που τοποθετείται σε ένα αιολικό πάρκο επηρεάζει το κόστος, ακόμη και αν τα αιολικά πάρκα υποβληθούν στις ίδιες ακριβώς καιρικές συνθήκες.

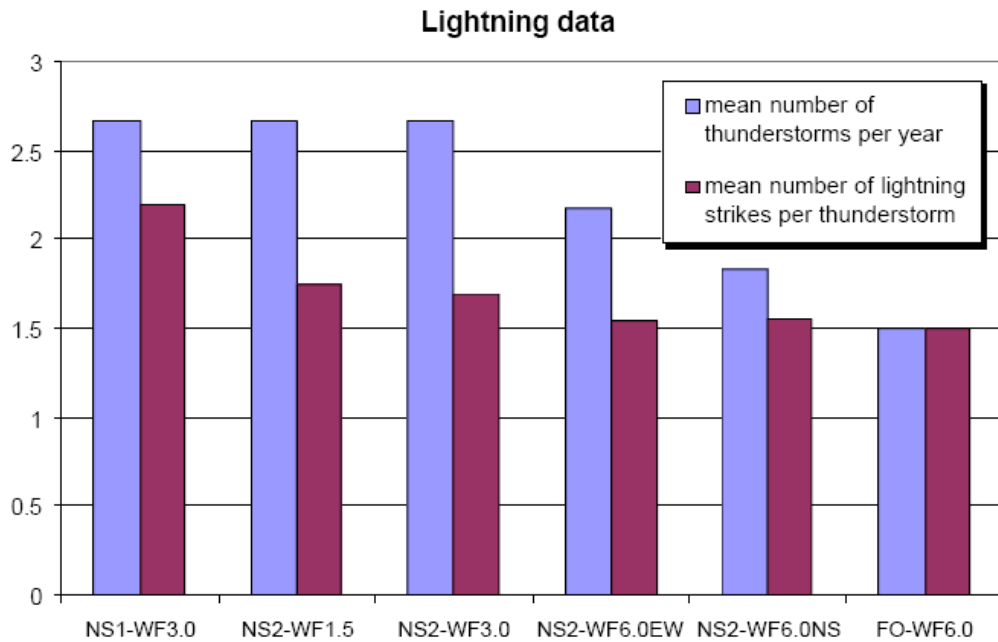
Στον πίνακα 4.6 και στο διάγραμμα 4.4 απεικονίζονται οι ετήσιες δαπάνες για 6 διαφορετικές περιπτώσεις, ενώ στο διάγραμμα 4.5 απεικονίζονται ο αριθμός των καταιγίδων ανά έτος και ο αριθμός των κεραυνικών πληγμάτων ανά καταιγίδα.

Αιολικό πάρκο	Κόστος [kEuro]			
	Σύνολο	Επιθεώρηση	Επισκευή	Απώλειες εσόδων
NS1-WF3.0	182.9	41.8	118.7	22.4
NS2-WF1.5	287.6	50.8	221.9	14.9
NS2-WF3.0	170.9	50.7	100.7	19.5
NS2-WF6.0EW	167.4	41.2	95.5	30.7
NS2-WF6.0NS	141.2	34.7	80.6	25.9
FO-WF6.0	148.6	52.3	72.1	24.2

Πίνακας 4.6 : Ετήσιες δαπάνες αιολικών πάρκων [18]



Διάγραμμα 4.4 : Ετήσιες δαπάνες [18]



Διάγραμμα 4.5: Αριθμός καταιγίδων ανά έτος και αριθμός κεραυνικών πληγμάτων ανά καταιγίδα [18]

Από τον πίνακα και τα διαγράμματα μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Για ένα παράκτιο αιολικό πάρκο συνολικής ισχύος 100 MW, με ανεμογεννήτριες ισχύος 1.5-6 MW, οι μέσες ετήσιες δαπάνες για επιθεώρηση και επισκευή κυμαίνονται από 115 κ€ έως 273 κ€. Ένα τέτοιο αιολικό πάρκο παράγει περίπου 350,000 MWh τον χρόνο. Άρα το κόστος για επιθεώρηση και επισκευή ανάγεται σε 0.033-0.078 €cents/kWh, την στιγμή που το κόστος συντήρησης είναι της τάξης των 2 €cents/kWh. Άρα το κόστος του κεραυνικού πλήγματος είναι περίπου το 1.7-3.9 % του συνολικού κόστους συντήρησης. Η μη διαθεσιμότητα του αιολικού πάρκου κυμαίνεται μεταξύ 0.06-0.11 % και οι απώλειες εσόδων λόγω κεραυνικού πλήγματος είναι το 0.11 % των συνολικών ετήσιων εσόδων.
- Το κόστος επισκευής ανέρχεται στο 48-77 % του συνολικού κόστους, ενώ το κόστος επιθεώρησης και οι απώλειες εσόδων αποτελούν το 18-35 % και 11-18 % του συνολικού κόστους αντίστοιχα.

- Στην 1η και 3η γραμμή του πίνακα έχουμε δύο ίδια αιολικά πάρκα σε απόσταση 12 km και 30 km από την ακτή αντίστοιχα. Ο αριθμός των καταιγίδων στις δύο περιοχές είναι ο ίδιος άρα και ο αριθμός των επιθεωρήσεων στα δύο αιολικά πάρκα θα είναι επίσης ο ίδιος. Παρατηρείται ωστόσο μία διαφορά στο κόστος επιθεώρησης της τάξης του 21 % που οφείλεται στον μεγαλύτερο χρόνο μεταφοράς λόγω των επιπλέον 18 km της 3ης περίπτωσης. Επίσης ο αριθμός των κεραυνικών πληγμάτων είναι μικρότερος στην περιοχή των 30 km, κάτι που συνεπάγεται λιγότερες βλάβες, άρα μικρότερο κόστος επισκευής και κατά 7 % μικρότερο συνολικό κόστος.
- Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των αιολικών πάρκων με ανεμογεννήτριες των 6 MW στην περιοχή των 30 km (κατά την κατεύθυνση ανατολή - δύση και βορρά - νότου) με τα αποτελέσματα του ίδιου αιολικού πάρκου στην περιοχή των 300 km, παρατηρούμε ότι ο αριθμός των κεραυνικών πληγμάτων ανά καταιγίδα για τις περιοχές αυτές, είναι σχεδόν ο ίδιος. Ωστόσο ο αριθμός των καταιγίδων ανά έτος είναι μικρότερος στην περιοχή των 300 km, έτσι ο αριθμός των επιθεωρήσεων και των ανεμογεννητριών που χρειάζονται επιδιόρθωση θα είναι επίσης μικρότερος. Παρά τις λιγότερες επιθεωρήσεις, το κόστος επιθεώρησης είναι υψηλότερο λόγω της πολύ μεγαλύτερης απόστασης από την ακτή. Συνήθως όμως τόσο απομακρυσμένα αιολικά πάρκα διαθέτουν σε απόσταση 30 km από τις ανεμογεννήτριες, έναν μόνιμα επανδρωμένο υποσταθμό όπου εδρεύει το προσωπικό για συντήρηση. Αυτό σε συνδυασμό με τις λιγότερες κατεστραμμένες ανεμογεννήτριες, οδηγεί σε χαμηλότερο κόστος επισκευής και λιγότερες απώλειες εσόδων.
- Συγκρίνοντας τις ανεμογεννήτριες των 1.5 MW με αυτές των 3 MW παρατηρούμε ότι το συνολικό κόστος των μικρότερων ανεμογεννητριών είναι υψηλότερο λόγω του σχεδόν διπλάσιου κόστους επισκευής. Αυτό συμβαίνει γιατί οι ανεμογεννήτριες των 1.5 MW δεν είναι εξοπλισμένες με έναν μεγάλο εσωτερικό γερανό, έτσι για μερικούς τύπους επισκευών είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση εξωτερικού εξοπλισμού ανύψωσης γεγονός που αυξάνει το κόστος. Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων των ανεμογεννητριών των 3 MW και των 6 MW προκύπτει ότι το αιολικό πάρκο με τις μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες εμφανίζει λιγότερες βλάβες λόγω κεραυνού, επειδή ο αριθμός των επιθεωρήσεων και ο αριθμός των ανεμογεννητριών που χρειάζονται επισκευή είναι μικρότερος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η επιφάνεια συλλογής για ένα αιολικό πάρκο με μεγάλες ανεμογεννήτριες είναι μικρότερη από την αντίστοιχη επιφάνεια ενός αιολικού πάρκου με μικρότερες ανεμογεννήτριες αλλά ίδια συνολική

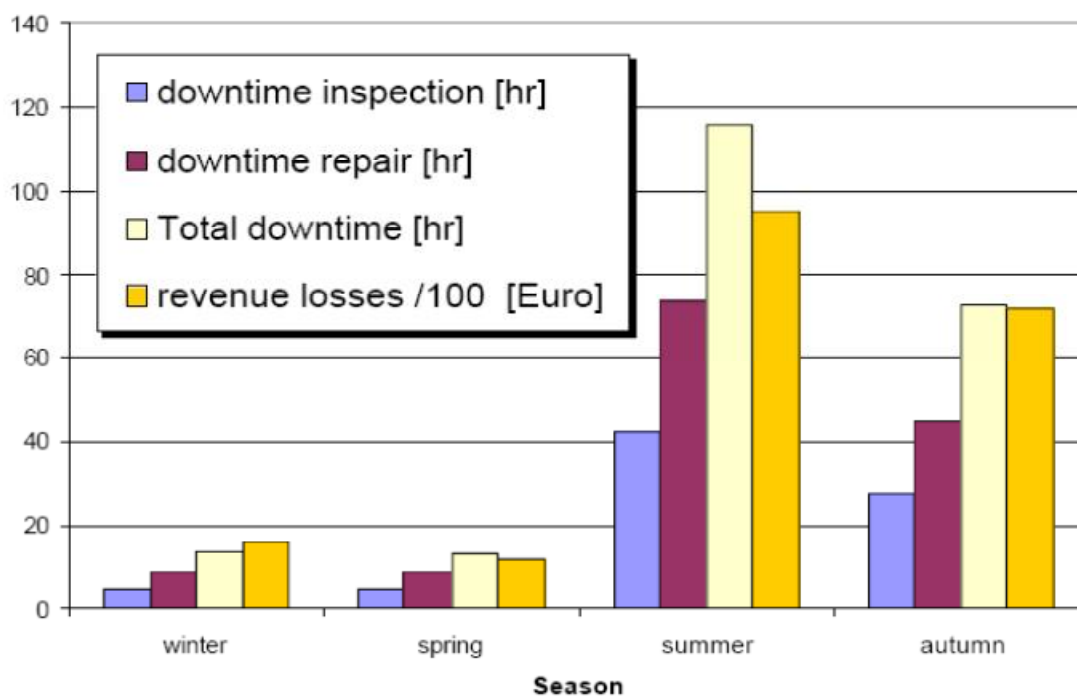
ισχύ. Αν και λιγότερες ανεμογεννήτριες έχουν υποστεί βλάβες, οι απώλειες εσόδων είναι μεγαλύτερες για τις ανεμογεννήτριες των 6 MW. Αυτές οι απώλειες αντισταθμίζονται πλήρως από το χαμηλό κόστος επιθεώρησης και επισκευής. Έτσι οι συνολικές δαπάνες ενός αιολικού πάρκου συγκεκριμένου μεγέθους μειώνονται όσο η ισχύς των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών αυξάνεται. Στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε την επίδραση των εποχών του έτους στον χρόνο διακοπής και στις απώλειες εσόδων. Για τον σκοπό αυτόν θα χρησιμοποιήσουμε το αιολικό πάρκο NS2-WF3.0 (τα στοιχεία του δόθηκαν στον πίνακα 4.5). [18]

Η συχνότητα εμφάνισης κεραυνού και η ταχύτητα του ανέμου ποικίλλουν κατά την διάρκεια του έτους όπως φαίνεται στον πίνακα 4.7.

<i>Εποχή</i>	<i>Ποσοστό κεραυνών ανά καταιγίδα [%]</i>	<i>Ταχύτητα ανέμου [m/s]</i>
Χειμώνας	6	9.23
Άνοιξη	6	7.71
Καλοκαίρι	54	7.33
Φθινόπωρο	34	8.22

Πίνακας 4.7 : Κεραυνοί και ταχύτητα ανέμου ανά εποχή [18]

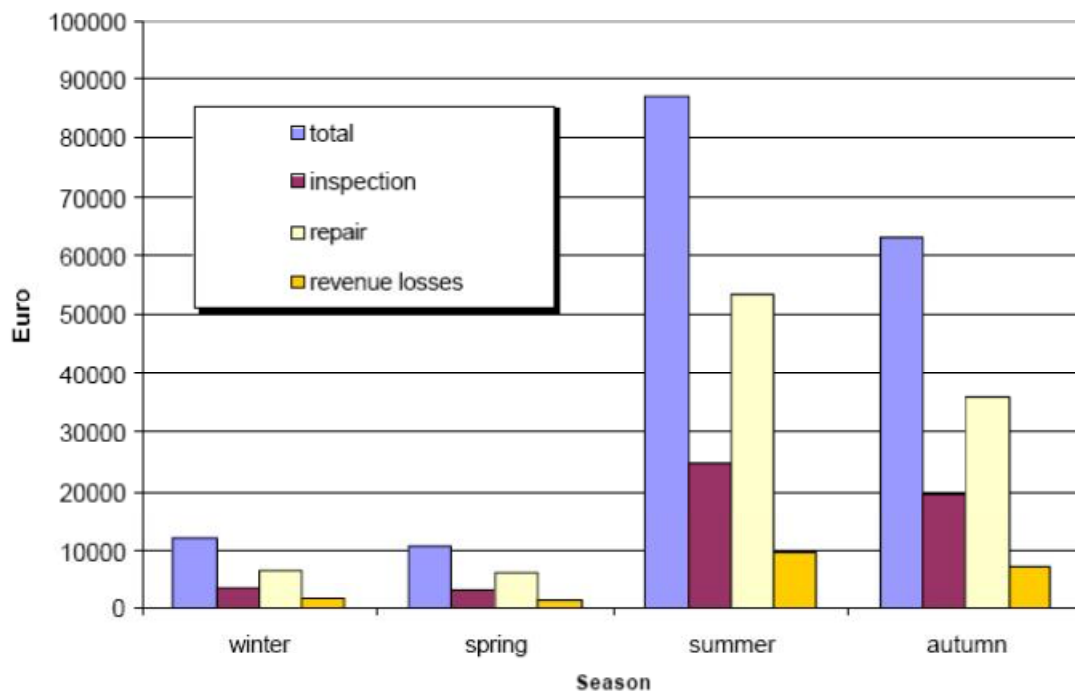
Στο διάγραμμα 4.6 παρουσιάζονται ο χρόνος διακοπής (και στο σύνολό του αλλά και διαιρεμένος στους χρόνους επιθεώρησης και επισκευής), μαζί με τις απώλειες εσόδων.



Διάγραμμα 4.6 : Χρόνος διακοπής και απώλειες εσόδων[18]

Οι χρόνοι διακοπής που αναφέρονται είναι οι συνολικοί χρόνοι διακοπής όλων των ανεμογεννητριών. Όπως ήταν αναμενόμενο το καλοκαίρι (που έχει την μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης κεραυνού), έχει και τον μεγαλύτερο χρόνο διακοπής. Αντίθετα το χειμώνα και την άνοιξη ο χρόνος διακοπής εμφανίζει την ελάχιστη τιμή του. Επίσης δεδομένου ότι το καλοκαίρι η ταχύτητα του ανέμου είναι η ελάχιστη, οι απώλειες εσόδων γίνονται μέγιστες.

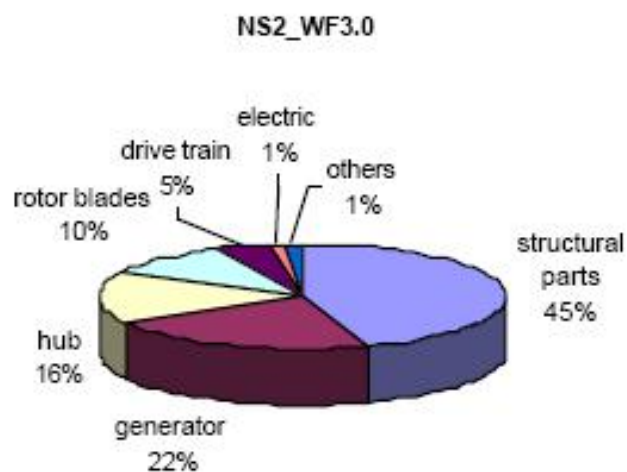
Στο διάγραμμα 4.7 φαίνονται οι μακροπρόθεσμες μέσες δαπάνες ανά εποχή. Εκτός από τις συνολικές δαπάνες απεικονίζονται ακόμη τα κόστη επιθεώρησης και επισκευής καθώς και οι απώλειες εσόδων ανά εποχή.



Διάγραμμα 4.7 : Μακροπρόθεσμες μέσες δαπάνες ανά εποχή [18]

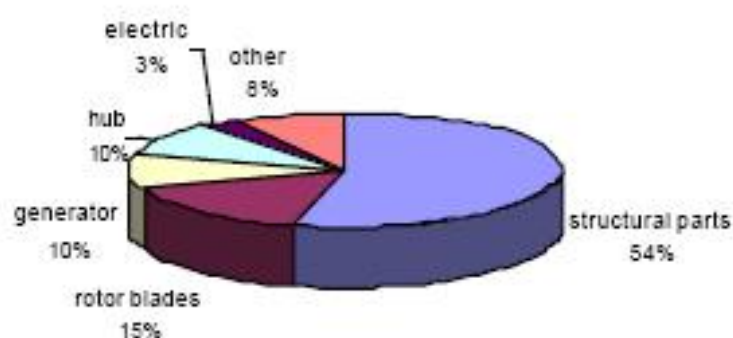
Όπως οι απώλειες εισοδήματος, έτσι και το κόστος επιθεώρησης δεν είναι ανάλογο με τον μέσο αριθμό καταιγίδων, επειδή η δυνατότητα πρόσβασης το καλοκαίρι είναι πολύ καλύτερη απ' ό,τι τον χειμώνα.

Στο διάγραμμα 4.8 απεικονίζεται ο χρόνος διακοπής που οφείλεται στην επισκευή των επιμέρους στοιχείων της ανεμογεννήτριας. [18]



Διάγραμμα 4.8 : Κατανομή χρόνου διακοπής [18]

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα η επισκευή των δομικών στοιχείων είναι η πιο χρονοβόρα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για την αντικατάσταση μεγάλων δομικών μερών απαιτούνται ειδικά μηχανήματα η χρήση των οποίων είναι εφικτή μόνο κάτω από αυστηρά καλές καιρικές συνθήκες, γεγονός που καθυστερεί την όλη διαδικασία. Τέλος στο διάγραμμα 4.9 απεικονίζεται το κόστος επισκευής των επιμέρους στοιχείων της ανεμογεννήτριας.



Διάγραμμα 4.9 : Κατανομή του κόστους επισκευής [18]

Αν και η πιθανότητα να πληγούν τα δομικά μέρη από κεραυνό είναι πολύ μικρή, το κόστος επισκευής τους είναι μεγαλύτερο από οποιουδήποτε άλλου στοιχείου της ανεμογεννήτριας (54 %). Ακολουθούν τα πτερύγια του στροφέα με 15 %, ενώ τα ηλεκτρικά μέρη έχουν το μικρότερο κόστος επισκευής με ποσοστό μόλις 3 %. [18]

Αναφορές 4^{ου} κεφαλαίου

1. IEC 61400-24, Wind Turbine Generator Systems – Part 24: Lightning Protection.
2. Ian Coton, Nick Jenkins, Nikos Hatziargyriou, Maria Lorentzou, Stephen Haigh, Mark Hancock, “Lightning protection of wind turbines”, UMIST, Manchester, UK, First Edition, February 1999
3. G. Le Roy, C. Gary, B. Hutzler, J. Lalot and C. Dubanton : “Les propriétés diélectriques de l’air et les très hautes tensions”, Collection de la Direction des Études et Recherches d’Électricité de France, Editions Eyrolles, 1984.
4. European Guideline, GUIDELINE No 22:2010 F
5. IEC TR 61400-24 Ed. 1. 2002-071: “Wind turbine generator systems- Part 24 lightning protection”
6. IEC 62305-1 Ed. 1. 2006-1: “Protection against lightning - Part 1:General principles
7. C Hopf, J Wiesinger, “Blitzschutz von Windkraftanlagen”, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 94
8. I Cotton, N Jenkins, K Pandiaraj, “Lightning Protection for Wind Turbine Blades and Bearings”, Wind Energy Journal,
9. F. Drumm, G. Bäuml, W. Zischank, R. Brocke, J. Schönau: “Behaviour of protected composite materials exposed to lightning impulse and continuing currents”, 24th Int. conference on Lightning Protection (ICLP), Birmingham 1998
10. IEC 61643-1 Ed. 2.: 2005-03 “Low-voltage surge protective devices - Part 11: Surge protective devices connected to low-voltage power systems; Requirements and tests“.
11. IEC 61643-21 Ed. 1.0: 2000-09 “Low voltage surge protective devices - Part 21: Surge protective devices connected to telecommunications and signalling networks – Performance requirements and testing methods”
12. P. Hasse, P. Zahlmann, "Lightning currents and overvoltages – one arrester for universal use" 26th Int. conference on lightning protection, Cracow 2002
13. N. Stefanatos, P. Papadopoulos, E. Binopoulos, A. Kostakos, G. Spyridakis, “Effects of long term operation on the performance characteristics of cupanemometers”, Centre for Renewable Energy Sources (CRES), Wind Energy Department Laboratory for Wind Turbine Testing, Pikermi, Attiki, Greece.

14. Curtis W. Dodd, Thomas McCalla, Jr., and James G. Smith, College of Engineering and Technology Southern Illinois University Carbondale, Illinois 62901
15. Ian Coton, Nick Jenkins, Nikos Hatzargyriou, Maria Lorentzou, Stephen Haigh, Mark Hancock, "Lightning protection of wind turbines", UMIST, Manchester, UK, First Edition, February 1999
16. K. Yamamoto, T. Noda, S. Yokoyama, A. Ametani, "Experimental and Analytical Studies of Lightning Overvoltages in Wind Turbine Generation Systems", Proceedings of International Conference on Power Systems Transients 2007, Lyon, France 04 – 07 June 2007, paper 58
17. Shigeru Yokoyama, "Study on Lightning Damage Mechanism of Wind Power Generators", Japan, 2005
18. L. Rademarks, H. Braam, H.R.A Wessels, R.K.N.J Prins, R. Lok, L. Leunis, S. Ramakers, "Lightning Damage of OWECS", ECN, June 2002
19. Internet, <http://www.flickr.com/photos/theunabonger/2435004159/>

5. ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΓ

5.1 Αξιολόγηση του κινδύνου βλάβης από κεραυνό σε ΑΓ

Ο σχεδιασμός κάθε συστήματος αντικεραυνικής προστασίας πρέπει να λαμβάνει υπόψη τον κίνδυνο φθοράς της κατασκευής, που θα πληγεί από τον κεραυνό. Ο κίνδυνος κάποια κατασκευή να πληγεί από κεραυνό είναι αποτέλεσμα του ύψους της κατασκευής, του τοπικού ανάγλυφου του εδάφους, του τοπικού επιπέδου κεραυνικής δραστηριότητας και του βαθμού απομόνωσης της κατασκευής. Μια ζημιά που οφείλεται σε κεραυνό μπορεί να πάρει τη μορφή κινδύνου για τον άνθρωπο απ' την έντονη ανάπτυξη τάσεων ή τις εκρήξεις και τις πυρκαγιές που πιθανών να προκληθούν από το κτύπημα του κεραυνού. Η ζημιά από κεραυνό μπορεί επίσης να εμφανιστεί σαν φυσική φθορά της κατασκευής ή των επιμέρους τμημάτων της. Πληροφορίες σχετικά με τις εκάστοτε τοπικές κεραυνικές συνθήκες πρέπει να συλλέγονται όποτε αυτό είναι εφικτό. Ο σκοπός κάθε συστήματος αντικεραυνικής προστασίας είναι να περιοριστεί η πιθανή φθορά σε ανεκτό επίπεδο. Το ανεκτό αυτό επίπεδο βασίζεται σε έναν αποδεκτό κίνδυνο αν εμπλέκεται κίνδυνος της ανθρώπινης ακεραιότητας. Αν η ανθρώπινη ασφάλεια δεν ενταχθεί μέσα σ' αυτό το πλαίσιο ή ακόμη ο κίνδυνος της ζημιάς είναι κάτω από τον αποδεκτό κίνδυνο για τον άνθρωπο, τότε οποιαδήποτε ανάλυση είναι καθαρά οικονομική. Αυτό γίνεται αξιολογώντας το κόστος εγκατάστασης του συστήματος της αντικεραυνικής προστασίας ενάντια στο κόστος της φθοράς και της καταστροφής που θα αποτρέψει.

Το πρότυπο IEC 62305 περιλαμβάνει κάποιες πληροφορίες σχετικά με την αξιολόγηση του κινδύνου πτώσης κεραυνού σε μια εγκατάσταση. Οι πληροφορίες που περιέχονται σ' αυτές τις δημοσιεύσεις συνοψίζονται παρακάτω και χρησιμοποιούνται προκειμένου να επεξηγηθούν ορισμένα σημαντικά ζητήματα, συγκεκριμένα για τους κινδύνους στις ΑΓ. Η ανάλυση εντούτοις είναι περιορισμένη και δεν πρέπει να παραμένει στα πλαίσια ενός παραδείγματος. Το πλήρες πρότυπο ή τεχνική έκθεση πρέπει να αναφέρονται.

5.1.1 Αξιολόγηση της συχνότητας πτώσης κεραυνού σε A/Γ [1], [2]

Το πρώτο στάδιο σε οποιαδήποτε ανάλυση κινδύνου κεραυνού είναι η εκτίμηση της συχνότητας πτώσης κεραυνών. Το πρότυπο IEC 62305 δίνει μια καθοδήγηση στο πως μπορεί να εκτιμηθεί η συχνότητα πτώσης κεραυνού. Αξιολογώντας τη συχνότητα πτώσης κεραυνού σε μια εγκατάσταση, η συλλογή στοιχείων που απαριθμούν την τοπική πυκνότητα πτώσης κεραυνού σε δεδομένη περιοχή (N_g), είναι απαραίτητη. Η πυκνότητα πτώσης κεραυνών στο έδαφος, είναι ένα μέτρο του ετήσιου αριθμού των κεραυνών που πέφτουν σε μια έκταση 1km^2 . Οι τιμές για διάφορες τοποθεσίες σε όλο τον κόσμο μεταβάλλονται μεταξύ του 0 και του 20. Ο ετήσιος αριθμός των ημερών καταιγίδας είναι ο αριθμός των ημερών κατά τις οποίες μπορεί να ακουστεί καταιγίδα και κεραυνοί σε μια δεδομένη περιοχή και μεταβάλλεται μεταξύ 5 και 30 ημερών στην Ευρώπη, ενώ σε κάποια μέρη μπορεί να φτάσει τις 140. Μετρήσεις της πυκνότητας πτώσης κεραυνού στο έδαφος γίνονται όλο και συχνότερα μιας και εγκαθίστανται συστήματα ανίχνευσης κεραυνικών πληγμάτων. Έτσι μπορούν να αποκτηθούν χάρτες της πυκνότητας των κεραυνικών πληγμάτων σε μια δεδομένη περιοχή. Αν η πυκνότητα πτώσης κεραυνού σε περιοχή δεν είναι διαθέσιμη, μπορεί τότε να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση με την βοήθεια των ισοκεραυνικών χαρτών:

$$N_g = 0.04 \cdot T_d^{1.25}$$

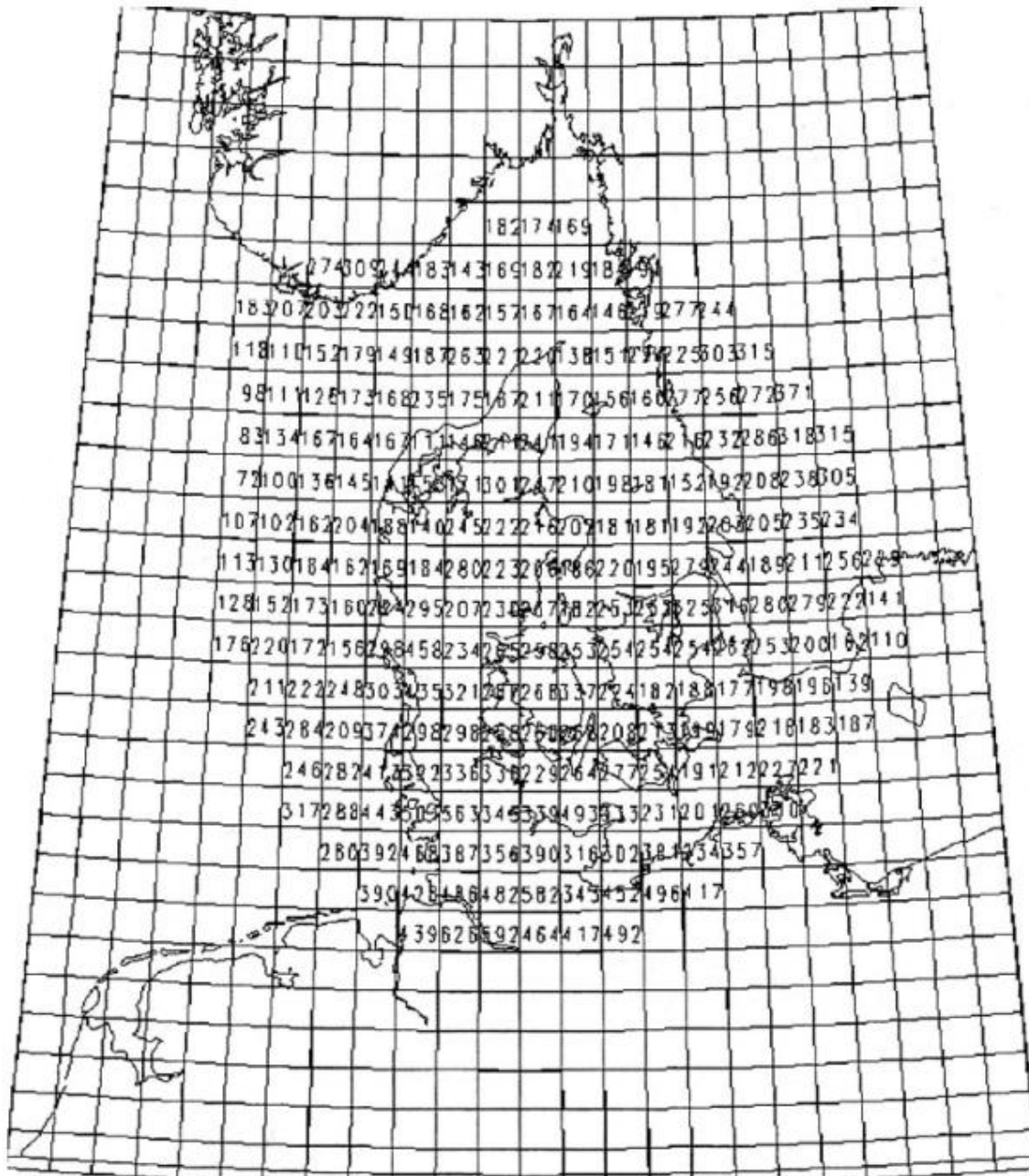
όπου

N_g : η μέση ετήσια πυκνότητα τοπικής πτώσης κεραυνού ανά km^2

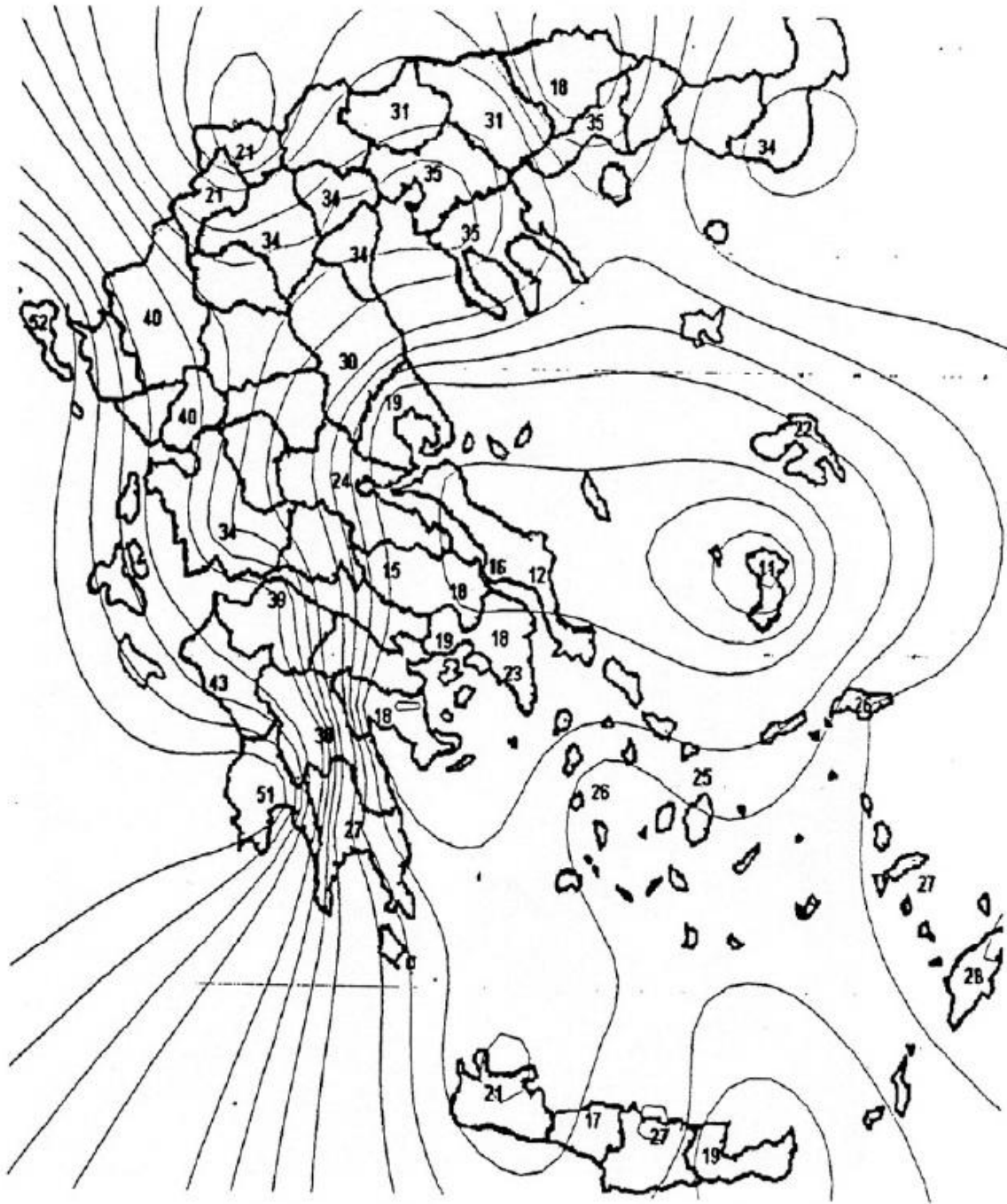
T_d : ο αριθμός των ημερών καταιγίδας ανά έτος που λαμβάνεται από ισοκεραυνικούς χάρτες (που λαμβάνονται από εθνικές μετεωρολογικές υπηρεσίες).

Τυπικοί χάρτες που απεικονίζουν την πυκνότητα κεραυνικών πληγμάτων για την Δανία και το Ηνωμένο Βασίλειο δίνονται στις εικόνες 5.1 και 5.3. Ο ισοκεραυνικός χάρτης για την Ελλάδα δίνεται στην εικόνα 5.2. Όλοι οι χάρτες αυτοί απεικονίζουν την διαφοροποίηση της κεραυνικής δραστηριότητας σε μια γεωγραφική περιοχή. Η πυκνότητα των κεραυνικών πληγμάτων είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για να εκτιμήσουμε τον κίνδυνο από κεραυνό. Πολύ σημαντικός όμως παράγοντας είναι και η πολικότητα του κεραυνού. Παγκοσμίως, το 90% όλων των κατερχόμενων κεραυνών είναι αρνητικής πολικότητας. Σε αντίθεση, σε μερικές συγκεκριμένες περιοχές του κόσμου το 90% των κατερχόμενων κεραυνών είναι θετικής

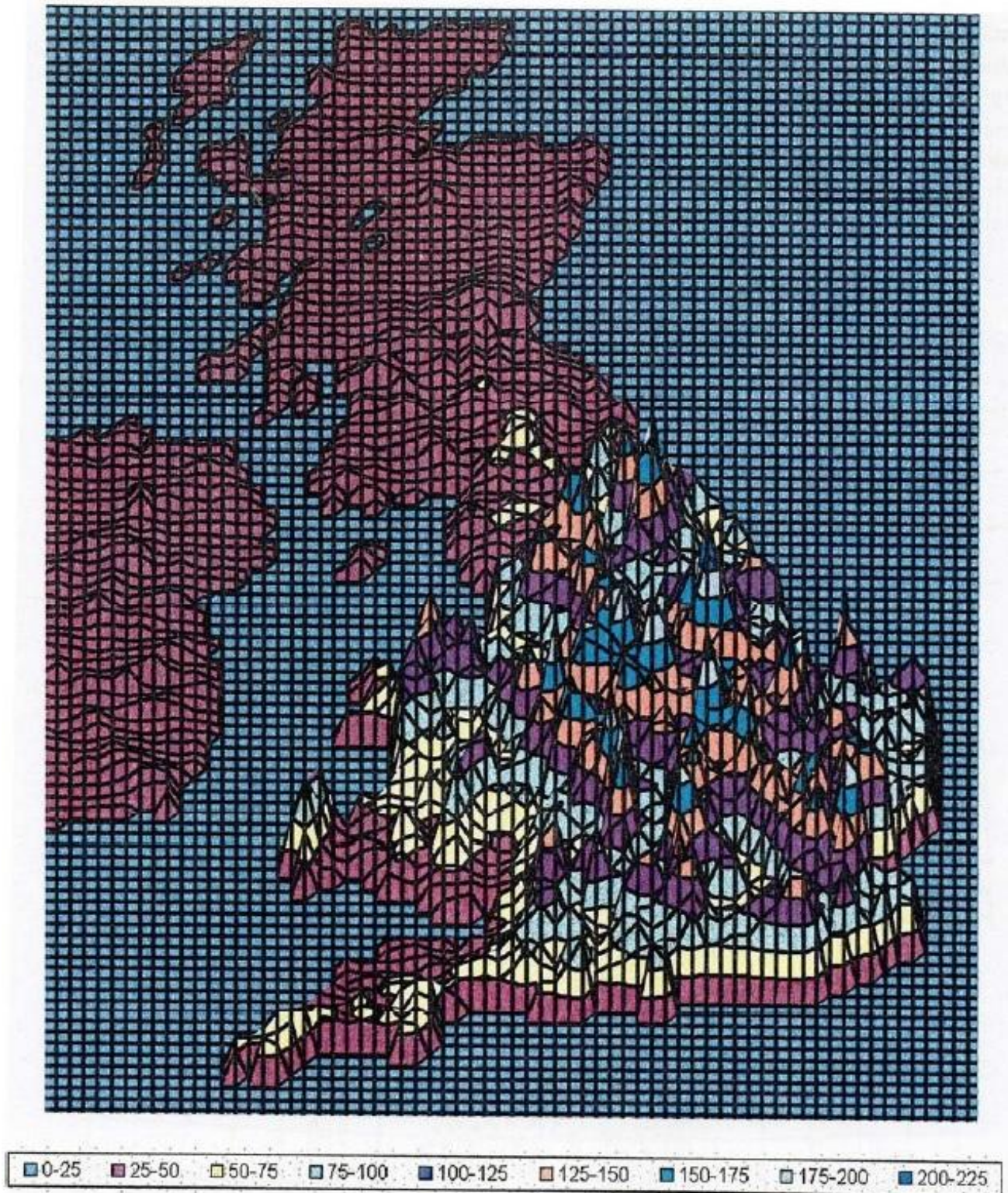
πολικότητας. Για παράδειγμα στα βορειοδυτικά του Ηνωμένου Βασιλείου επικρατούν οι θετικής πολικότητας κεραυνοί. Εάν μια Α/Γ βρίσκεται σε περιοχή όπου παρατηρείται μεγάλο ποσοστό κεραυνών θετικής πολικότητας, πρέπει να ληφθούν μέτρα αυξημένης αντικεραυνικής προστασίας. Οι μετρήσεις δείχνουν ότι θετικοί κεραυνοί κυριαρχούν κατά τους χειμερινούς μήνες και στην Ευρώπη, ένα μεγάλο ποσοστό τέτοιων θετικών κεραυνών μπορεί να παρατηρηθεί σε περιοχές δίπλα στον Ατλαντικό ωκεανό ή στην Βόρεια Θάλασσα.



Εικόνα 5.1 : Μέση ετήσια πυκνότητα κεραυνικών πληγμάτων για την Δανία (κεραυνοί ανά επιφάνεια 1000 km²) [2]



Εικόνα 5.2 : Ετήσιος αριθμός ημερών καταιγίδας στην Ελλάδα[2]



Εικόνα 5.3 : Συνολικός αριθμός κεραυνικών πληγμάτων για 100 km² στο Ηνωμένο Βασίλειο μεταξύ των ετών 1989 και 1994 [2]

Η μέση ετήσια συχνότητα άμεσων πληγμάτων κεραυνού στην εγκατάσταση μπορεί να υπολογιστεί από:

$$N_d = N_g \cdot A_d \cdot C_d \cdot 10^{-6} [1]$$

όπου

N_d : ο μέσος ετήσιος αριθμός άμεσων πληγμάτων κεραυνού στο έδαφος

N_g : η μέση ετήσια πυκνότητα τοπικής πτώσης κεραυνού ανά 1km²

A_d : η ισοδύναμη συλλεκτήρια επιφάνεια άμεσων πληγμάτων κεραυνού στην εγκατάσταση

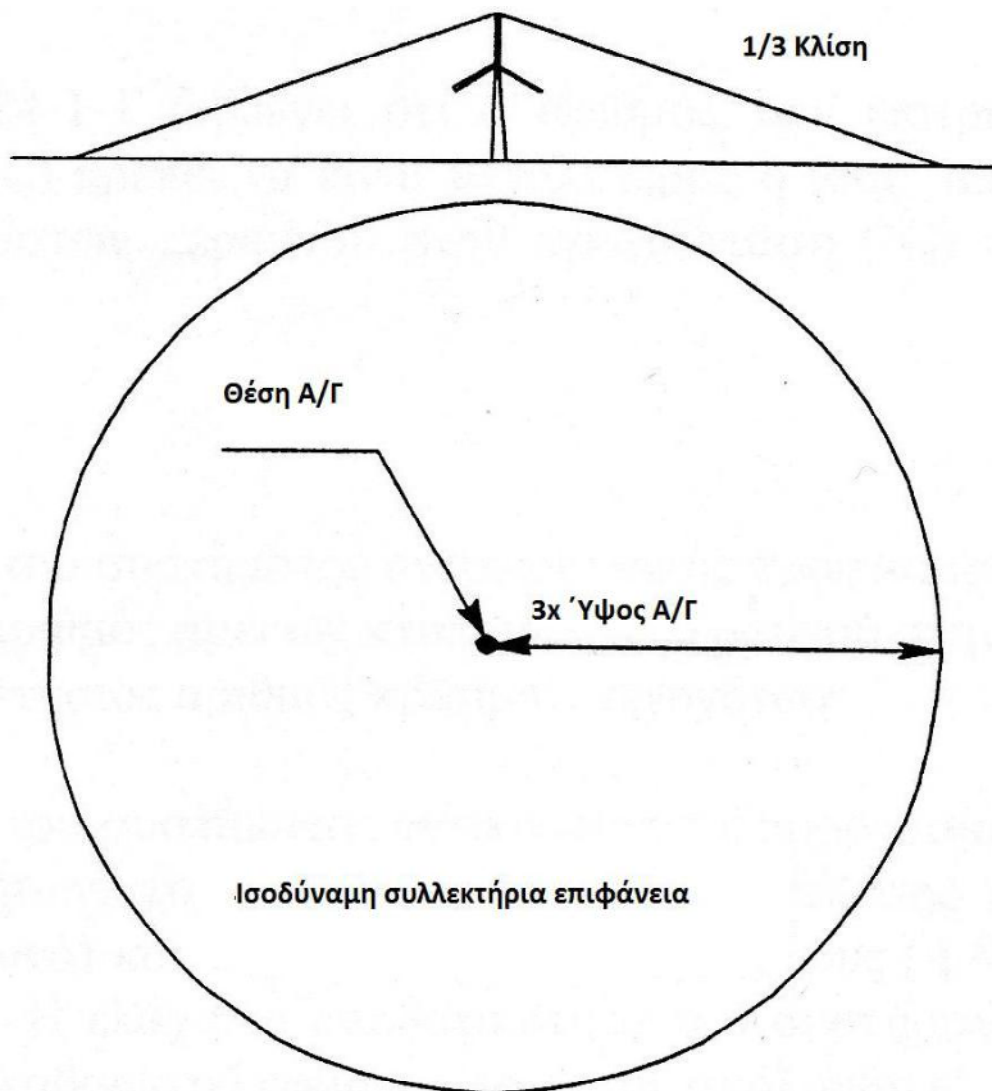
C_d : ο περιβαλλοντικός παράγοντας. Κατάλληλες τιμές είναι $C_d=1$ για Α/Γ σε επίπεδο εδάφους και $C_d=2$ για Α/Γ σε λόφο ή ύψωμα.

Η ισοδύναμη συλλεκτήρια επιφάνεια για εγκατάσταση καθορίζεται ως μια περιοχή της επιφάνειας του εδάφους που παρουσιάζει την ίδια ετήσια συχνότητα άμεσων πληγμάτων κεραυνού με την εγκατάσταση. Ο υπολογισμός της ισοδύναμης συλλεκτήριας επιφάνειας βασίζεται στην γεωμετρία της κατασκευής. Με την αύξηση της έκτασης ή του ύψους της κατασκευής αυξάνεται ανάλογα και η ισοδύναμη συλλεκτήρια επιφάνεια. Ο αριθμός των κατερχόμενων κεραυνών προς την κατασκευή λαμβάνεται πολλαπλασιάζοντας την ισοδύναμη συλλεκτήρια επιφάνεια της κατασκευής με την πυκνότητα πτώσης κεραυνών στην περιοχή. Έτσι αν η μέση ετήσια πυκνότητα κεραυνοπληξίας είναι 0,7 πλήγματα ανά km² ανά έτος και έστω ότι η κατασκευή έχει ισοδύναμη περιοχή συλλογής 0,1 km² τότε θα δέχεται περίπου 0,07 πλήγματα κατερχόμενων κεραυνών ανά έτος. Για μεμονωμένες κατασκευές η ισοδύναμη συλλεκτήρια επιφάνεια, είναι η περιοχή που περικλείεται από την οριακή γραμμή η οποία είναι η τομή της επιφάνειας του εδάφους και της επιφάνειας που προκύπτει από πλήρη περιστροφή της ευθείας με κλίση 1/3 ως προς τον ορίζοντα η οποία διέρχεται από τα υψηλότερα σημεία της κατασκευής. Συστήνεται όλες οι Α/Γ να σχεδιάζονται σαν ένας ψηλός ιστός με ύψος ίσο με το ύψος της πλήμνης συν την ακτίνα του ρότορα. Αυτό ισχύει για Α/Γ με οποιοδήποτε τύπο πτερυγίων συμπεριλαμβανομένων και των πτερυγίων που απλώς είναι κατασκευασμένα από μη αγωγίμο υλικό όπως πλαστικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού.

Η εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 5.4) δείχνει την ισοδύναμη συλλεκτήρια επιφάνεια που σχηματίζεται από μια Α/Γ εγκατεστημένη σε επίπεδο έδαφος. Εμφανώς η περιοχή αυτή είναι ένας κύκλος με ακτίνα τρεις φορές το ύψος της Α/Γ. Η ακόλουθη εξίσωση μπορεί επομένως να χρησιμοποιηθεί κατά τον υπολογισμό του ετήσιου αριθμού πληγμάτων κεραυνού σε Α/Γ εγκατεστημένη σε επίπεδο έδαφος.

$$N_d = N_g \cdot \pi \cdot (3 \cdot h)^2 \cdot 10^{-6} \leftrightarrow N_d = N_g \cdot \pi \cdot 9 \cdot h^2 \cdot 10^{-6} [1]$$

Όπου h: το ενεργό ύψος της Α/Γ σε μέτρα (το ύψος της πλήμνης συν την ακτίνα του ρότορα)



Εικόνα 5.4: Ισοδύναμη συλλεκτήρια επιφάνεια της Α/Γ [1]

Η παραπάνω μέθοδος δεν λαμβάνει υπ' όψιν της την πιθανή συμμετοχή των ανερχόμενων κεραυνών στην συχνότητα των πληγμάτων. Αυτός ο τύπος κεραυνών μπορεί να εμφανιστεί σε A/Γ πάνω από 100m εγκατεστημένες σε περιοχές όπου τα σύννεφα κοντά σ' αυτές όπως για παράδειγμα ορεινές περιοχές και περιοχές όπου παρατηρούνται χειμερινές καταιγίδες.

5.1.2 Αποτίμηση της συχνότητας πληγμάτων σε A/Γ με την χρήση θεωρητικών μοντέλων [2]

Για να ξεπεραστούν πιθανές υποεκτιμήσεις στην συχνότητα κεραυνικών πληγμάτων που οφείλονται στην αδυναμία του προτύπου να υπολογιστεί η συχνότητα των ανερχόμενων κεραυνών, χρησιμοποιείται μια μέθοδος που περιλαμβάνει τον συνδυασμό δύο ανεξάρτητων μοντέλων. Το ένα υπολογίζει την συχνότητα των κατερχόμενων κεραυνών ενώ το άλλο υπολογίζει την συχνότητα των ανερχόμενων κεραυνών. Το πρώτο μοντέλο χρησιμοποιείται για των υπολογισμό της συχνότητας των κατερχόμενων κεραυνών. Το μοντέλο προβλέπει μια εμπειρική έκφραση για την ακτίνα σύλληψης ενός ψηλού ιστού. Η παρακάτω εξίσωση έχει καθοριστεί για την ακτίνα σύλληψης,

$$r_a = 14 \cdot h_{overall}^{0,6} \text{ σε m [2]}$$

Η συλλεκτήρια επιφάνεια επομένως θα δίνεται από την παρακάτω σχέση,

$$A_e = 196 \cdot \pi \cdot (h_{overall})^{1,2} \text{ σε } m^2 [2]$$

Ο υπολογισμός της συχνότητας των πληγμάτων από ανερχόμενους κεραυνούς βασίζεται στο ότι η A/Γ θεωρείται σαν ένας ψηλός ιστός. Κατά την διάρκεια καταιγίδας το ηλεκτρικό πεδίο στο έδαφος κάτω από το σύννεφο αυξάνεται πάνω πολύ και αυτή η αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να είναι αρκετή ώστε να δημιουργηθεί ένας ανερχόμενος leader από την κορυφή ενός ψηλού ιστού. Έτσι είναι πιθανό να

εκκινήσει από το σημείο αυτό ένας ανερχόμενος κεραυνός. Η εξίσωση που υπολογίζει τον αριθμό των ανερχόμενων κεραυνών σε μια ψηλή κατασκευή δίνεται παρακάτω,

$$N_u = T_d \cdot \exp\left(\frac{(-\frac{a}{h_{overall}} + b)}{c}\right) \quad \text{ανά έτος [2]}$$

Τυπικές τιμές για τους συντελεστές της παραπάνω εξίσωσης είναι:

a: 1600 kV για επίπεδο έδαφος, 650 kV για υπερυψωμένο έδαφος

b: τυπική τιμή 2 kV^m⁻¹, τιμή για περιοχές με χαμηλά σύννεφα 3 kV^m⁻¹

c: τυπική τιμή 2 kV^m⁻¹, τιμές για περιοχές με χαμηλά σύννεφα 6 kV^m⁻¹

5.1.3 Μέθοδοι υπολογισμού της συχνότητας κεραυνικών πληγμάτων [2]

Πληροφορίες που συλλέχθηκαν από μηχανές που αποτελούν μέρος ενός προγράμματος 250 MW αιολικής ενέργειας στην Γερμανία δείχνουν ότι μια Α/Γ εγκατεστημένη σε ακτή της Γερμανίας αναμένεται να δεχθεί 0.024 άμεσα πλήγματα ανά έτος. Παρακάτω ακολουθεί ένα παράδειγμα υπολογισμού της συχνότητας των πληγμάτων και με το πρότυπο της IEC και με το συνδυασμένο μοντέλο. Απαραίτητες πληροφορίες για την τοπική κεραυνική δραστηριότητα και τα ύψη των Α/Γ δίνονται παρακάτω:

- Ενεργό ύψος Α/Γ (ύψος της πλήμνης συν ακτίνα του ρότορα): 45 m
- Πυκνότητα κεραυνικών πληγμάτων στο έδαφος: 0.6 km⁻²year⁻¹
- Αριθμός ημερών καταιγίδας ανά έτος: 15

Ο πολύ χαμηλός αριθμός των ανερχόμενων κεραυνών είναι αναμενόμενος για Α/Γ τέτοιου μεγέθους. Τοποθετώντας όμως Α/Γ ισχύος 1.5 MW στην ίδια τοποθεσία ο αριθμός των ανερχόμενων κεραυνών ανά έτος θα αυξάνονταν στο 0.006 year⁻¹. Εάν η Α/Γ αυτή τοποθετηθεί σε υπερυψωμένο έδαφος (κάτι που αλλάζει τον συντελεστή a σε 650 kV) η συχνότητα των ανερχόμενων κεραυνών γίνεται πλέον 0.03 year⁻¹.

Πρότυπο IEC	Συνδυαστικό μοντέλο
Υπολογισμός της ισοδύναμης συλλεκτήριας επιφάνειας για απομονωμένη Α/Γ σε επίπεδο έδαφος	Υπολογισμός της ισοδύναμης συλλεκτήριας επιφάνειας για απομονωμένη Α/Γ σε επίπεδο έδαφος
$A_e = 9 \cdot \pi \cdot h_{overall}^2$ $A_e = (9 \cdot \pi \cdot 45.0)^2$ $A_e = 57256m^2 = 0.057km^2$	$A_e = 196 \cdot \pi \cdot (h_{overall})^{1.2}$ $A_e = 196 \cdot \pi \cdot (45.0)^{1.2}$ $A_e = 59328m^2 = 0.059km^2$
Πολλαπλασιασμός της ισοδύναμης συλλεκτήριας επιφάνειας με την πυκνότητα κεραυνικών πληγμάτων στο έδαφος για τον υπολογισμό του ετήσιου αριθμού κατερχόμενων κεραυνικών πληγμάτων	Πολλαπλασιασμός της ισοδύναμης συλλεκτήριας επιφάνειας με την πυκνότητα κεραυνικών πληγμάτων στο έδαφος για τον υπολογισμό του ετήσιου αριθμού κατερχόμενων κεραυνικών πληγμάτων
$N_d = N_g \cdot A_e$ $N_d = 0.6 \cdot 0.057$ $N_d = 0.034year^{-1}$	$N_d = N_g \cdot A_e$ $N_d = 0.6 \cdot 0.059$ $N_d = 0.035year^{-1}$

Πίνακας 5.1 : Υπολογισμός του αριθμού των κατερχόμενων κεραυνών [2]

Πρότυπο IEC	Συνδυαστικό μοντέλο
Αδυναμία του προτύπου για τον υπολογισμό ανερχόμενων κεραυνών	Χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους συντελεστές (a=1600 kV, b=2 kVm ⁻¹ , c=2 kVm ⁻¹)
	$N_u = T_d \cdot \exp \frac{(-\frac{a}{h_{overall}} + b)}{c}$ $N_u = 15 \cdot \exp \frac{(-\frac{1600}{45.0} + 2)}{2}$ $N_u = 0.78 \cdot 10^{-6} year^{-1}$

Πίνακας 5.2: Υπολογισμός του αριθμού των ανερχόμενων κεραυνών [2]

Οι διαφορές στις τιμές των συχνοτήτων των κατερχόμενων κεραυνών μπορεί να οφείλονται σε έναν αριθμό παραμέτρων όπως:

- Προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται στην μοντελοποίηση των Α/Γ
- Φυσικές διακυμάνσεις στο ετήσιο επίπεδο και στην τοποθεσία της κεραυνικής δραστηριότητας
- Δεν προκαλούν φθορές όλα τα άμεσα πλήγματα και επομένως δεν λαμβάνονται υπόψη σαν άμεσα πλήγματα
- Το μοντέλο των κατερχόμενων κεραυνών δεν λαμβάνει υπόψη τις διαφορετικές διαδικασίες που λαμβάνουν μέρος στην ανάπτυξη ενός κατερχόμενου κεραυνού θετικής πολικότητας. Οι σχέσεις υπολογισμού ενδέχεται να είναι μη ακριβείς για Α/Γ εγκατεστημένες σε ακτογραμμές οι οποίες δέχονται κεραυνικά πλήγματα θετικής πολικότητας.

Είναι φανερό ότι η διαδικασία υπολογισμού της συχνότητας κεραυνικών πληγμάτων απαιτεί ακριβή δεδομένα που σχετίζονται με την πυκνότητα πτώσης κεραυνών στο έδαφος, το μέγεθος της Α/Γ και την τοποθεσία της. Προτείνεται για τον υπολογισμό της συχνότητας των κατερχόμενων κεραυνών να χρησιμοποιείται η μέθοδος που περιγράφεται στο πρότυπο της IEC. Η χρήση του συνδυαστικού μοντέλου θα δώσει μια ένδειξη για το πότε οι ανερχόμενοι κεραυνοί αποτελούν σημαντικό ποσοστό της συνολικής κεραυνικής δραστηριότητας. Η διαφορά στις τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της συχνότητας των ανερχόμενων κεραυνικών πληγμάτων παρέχει και μια εκτίμηση της διαφοροποίησης στην συχνότητα των πληγμάτων που υπάρχει μεταξύ των Α/Γ σε διαφορετικές τοποθεσίες.

5.1.4 Επιλογή της στάθμης προστασίας με χρήση του προτύπου IEC 62305 [1]

Μόλις εκτιμηθεί η συχνότητα πτώσης κεραυνού σε μια εγκατάσταση, τότε πρέπει να επιλεγεί ένα κατάλληλο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας. Μια πιθανή αποτυχία του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας οδηγεί σε αυτό που είναι γνωστό ως κρίσιμο γεγονός. Εάν μια αποτυχία του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας οδηγήσει στην απώλεια ανθρώπινης ζωής, ο επιτρεπόμενος ετήσιος αριθμός κρίσιμων γεγονότων είναι πιθανόν να τεθεί υπό μια εθνική ή τοπική νομική ή

ρυθμιστική αρχή. Όταν οποιεσδήποτε απώλειες που οφείλονται σε πτώση κεραυνού είναι καθαρά οικονομικές, ο επιτρεπόμενος ετήσιος αριθμός κρίσιμων γεγονότων μπορεί να τεθεί απ' τον ιδιοκτήτη της εγκατάστασης.

Ο επιτρεπόμενος αριθμός κρίσιμων γεγονότων, ποικίλει γενικά σύμφωνα με τη χρήση της εγκατάστασης, την τοποθεσία, την κατασκευή και το μέσο αριθμό των ατόμων μέσα ή κοντά σ' αυτήν σε οποιαδήποτε δεδομένη στιγμή. Το πρότυπο δηλώνει ότι ο αριθμός των επιτρεπόμενων ετήσιων κρίσιμων γεγονότων (N_c) πρέπει να είναι μεγαλύτερος ή ίσος απ' τον μέσο ετήσιο αριθμό άμεσων πληγμάτων κεραυνού στην εγκατάσταση (N_d) επί τον παράγοντα $(1-E)$

όπου

E : η αποτελεσματικότητα του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας

N_d : ο μέσος ετήσιος αριθμός άμεσων κτυπημάτων κεραυνού στην εγκατάσταση

N_c : ο επιτρεπόμενος ετήσιος αριθμός κρίσιμων γεγονότων

Η ελάχιστη αποτελεσματικότητα του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας, μπορεί να καθοριστεί εφαρμόζοντας την ακόλουθη σχέση:

$$E \geq 1 - \frac{N_c}{N_d} \text{ με } E \geq 1 - \frac{R_d}{R_a} \quad [1]$$

Όπου

R_d : ο κίνδυνος βλάβης

R_a : ο ανεκτός κίνδυνος βλάβης

Το πρότυπο IEC 62305 καθορίζει τέσσερα επίπεδα συστήματος αντικεραυνικής προστασίας. Αυτά εμφανίζουν τις αποδοτικότητες όπως φαίνονται στον πίνακα 5.3.

Επίπεδο προστασίας	Αποτελεσματικότητα
I	0.98
II	0.95
III	0.90
IV	0.80

Πίνακας 5.3 : Επίπεδα του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας [1]

Φυσικά, το αποδοτικότερο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας θα αποτελείται από μεγαλύτερες διαμέτρους αγωγών και πιο σύνθετα συστήματα εγκαταστάσεων κάτω απ' τη γη και θα διακρίνεται από πολλά και σε μικρή απόσταση μεταξύ τους σημεία σύλληψης του κεραυνού. Τα επίπεδα ρεύματος, ενέργειας, εύρους αύξησης του ρεύματος και της μεταφοράς φορτίου που απαιτούνται ώστε να ληφθούν οι διάφορες αποδοτικότητες μεγέθους του συστήματος αντικεραυνικής, φαίνονται στον πίνακα 5.4.

Επίπεδο προστασίας	Μέγιστο εύρος ρεύματος (kA)	Ειδική ενέργεια (kJΩ ⁻¹)	Μέση κλίση (kA/μs)	Ολικό φορτίο (C)
I	200	10000	200	300
II	150	5600	150	225
III+ IV	100	2500	100	150

Πίνακας 5.4 : Μέγιστες τιμές παραμέτρων κεραυνού που αντιστοιχούν στα επίπεδα προστασίας [1]

Έτσι ένα επίπεδο (I) συστήματος αντικεραυνικής προστασίας πρέπει, π.χ., να είναι ικανό να μεταφέρει μέγιστο ρεύμα 200kA χωρίς να προκληθεί ζημιά.

Παράδειγμα [1]

Έστω μια Α/Γ με ύψος πλήμνης 60m και διάμετρο ρότορα 60m. Βρίσκεται εγκατεστημένη σε περιοχή επίπεδου εδάφους με πυκνότητα τοπικής πτώσης κεραυνού 0.2 πλήγματα ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο ανά έτος. Ο επιτρεπόμενος ετήσιος αριθμός κρίσιμων γεγονότων, είναι 1 στα 100.000 (ένα χρησιμοποιούμενο επίπεδο στην Μ. Βρετανία). Δεδομένου ότι η Α/Γ δεν θα περιέχει προσωπικό για περισσότερο από 1% του χρόνου, ο επιτρεπόμενος αριθμός κρίσιμων γεγονότων μπορεί να τροποποιηθεί σε 1 στα 1.000 (1 στα 100.000 που πολλαπλασιάζεται με 1%). Η εκτιμώμενη συχνότητα πτώσης κεραυνών πρέπει αρχικά να υπολογιστεί,

$$N_d = N_g \cdot 9 \cdot \pi \cdot h^2 \cdot 10^{-6}$$

$$N_d = 0.2 \cdot 9 \cdot \pi \cdot 90^2 \cdot 10^{-6}$$

$$N_d = 0.046 \text{ year}^{-1}$$

Η αποτελεσματικότητα του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας (ΣΑΠ) πρέπει να είναι τέτοια ώστε λιγότερα από 1 στα 1.000 κρίσιμα γεγονότα να συμβαίνουν το έτος. Η απαιτούμενη αποτελεσματικότητα ΣΑΠ μπορεί επομένως να βρεθεί.

$$E \geq 1 - \frac{N_c}{N_d}$$

$$E \geq \left(1 - \frac{10^{-3}}{0.046} \right) \cdot 100\%$$

$$E \geq 97.8\%$$

Στην περιοχή λοιπόν αυτή, απαιτείται αποτελεσματικότητα ΣΑΠ 97.8%, έτσι με βάση τα παραπάνω θα πρέπει να εγκατασταθεί ένα επίπεδο (I) αντικεραυνικής προστασίας.

5.1.5 Καθορισμός των σημείων που πλήττονται από κεραυνό σε μια A/Γ με την μέθοδο της κυλιόμενης σφαίρας[3]

Το μοντέλο της κυλιόμενης σφαίρας χρησιμοποιείται σε μια κατασκευή για να προσδιοριστεί η θέση του εξοπλισμού της αντικεραυνικής προστασίας. Είναι μια διεθνώς αναγνωρισμένη μέθοδος, η οποία χρησιμεύει ιδιαίτερα σε εφαρμογές με πολύπλοκη γεωμετρία. Όπως έχει ήδη περιγραφεί στο κεφάλαιο 2, ο βηματικός leader ξεκινά από το σύννεφο προς το έδαφος. Καθώς η απόσταση μεταξύ της αρχής του βηματικού leader με το έδαφος μειώνεται το ηλεκτρικό πεδίο στην επιφάνεια της γης αυξάνεται. Όταν η τιμή του ηλεκτρικού πεδίου στο επίπεδο του εδάφους ξεπεράσει την τιμή διάσπασης του ατμοσφαιρικού αέρα, εκπηδούν από το σημείο αυτό ενωτικοί leaders, οι οποίοι κινούνται προς τα πάνω.

Η άκρη του βηματικού leader μπορεί να κατέλθει σε μια προκαθορισμένη απόσταση από το επίπεδο του εδάφους πριν ενωθεί με τους ανερχόμενους ενωτικούς leader, απόσταση που καθορίζεται από το αυξανόμενο ηλεκτρικό πεδίο στο έδαφος. Η μικρότερη απόσταση μεταξύ της άκρης του βηματικού leader και του σημείου εκκίνησης των ενωτικών leader είναι γνωστή σαν απόσταση πρόσκρουσης. Το ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο της κυλιόμενης σφαίρας βασίζεται στην υπόθεση ότι προσεγγίζει ανεπηρέαστη έως το σημείο της απόστασης πλήγματος. Το σημείο της ένωσης καθορίζεται από το προεξέχον αντικείμενο, το οποίο έχει την μικρότερη απόσταση από την άκρη του βηματικού leader. Έπειτα εκπηδούν οι ανερχόμενοι leaders. Κατ' αρχάς, υπάρχει μια αναλογία μεταξύ της τιμής κορυφής του ρεύματος του κεραυνού και του ηλεκτρικού φορτίου που είναι αποθηκευμένο στον leader. Επιπλέον η ένταση του πεδίου στο έδαφος συνδέεται γραμμικά με το φορτίο που είναι αποθηκευμένο στον leader. Η σχέση μεταξύ της τιμής κορυφής του ρεύματος και της απόστασης πλήγματος είναι η ακόλουθη:

$$R = 10 \cdot I^{0.65} \quad [3]$$

Από την παραπάνω εξίσωση συνάγεται ότι, κεραυνός με ρεύμα χαμηλότερης τιμής κορυφής του ρεύματος προσεγγίζει τα αντικείμενα στην γη σε μικρότερη απόσταση σε σχέση με κεραυνό με ρεύμα υψηλότερης τιμής κορυφής. Επιπλέον όσο υψηλότερο είναι το επίπεδο προστασίας τόσο χαμηλότερη είναι η τιμή κορυφής του

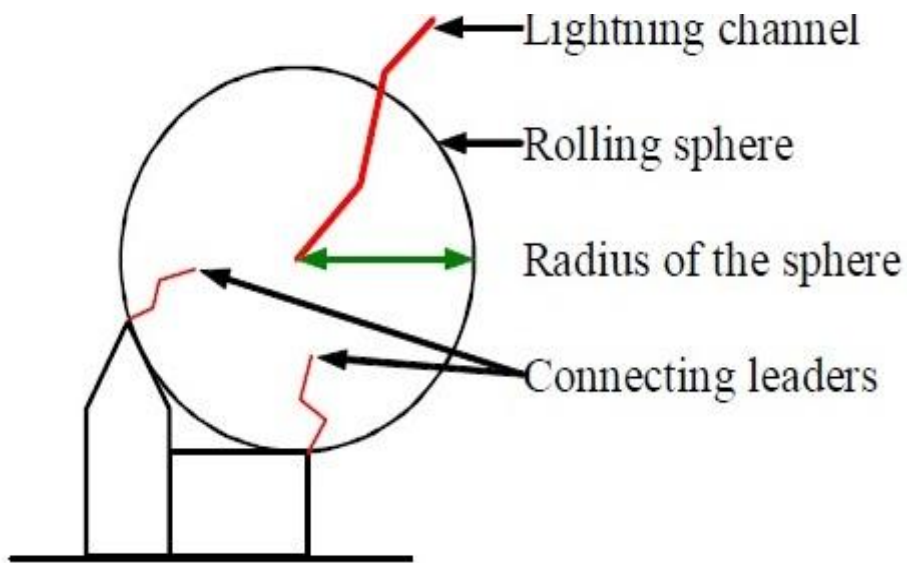
ρεύματος. Όπως ειπώθηκε και στα προηγούμενα τα συστήματα αντικεραυνικής προστασίας χωρίζονται σε τέσσερα επίπεδα προστασίας. Στον πίνακα 5.5 δίνεται η ακτίνα της κυλιόμενης σφαίρας και η τιμή του ρεύματος κορυφής του κεραυνού ανάλογα με το επίπεδο προστασίας.

Επίπεδο προστασίας	Απόσταση πρόσκρουσης R (m)	Τιμή ρεύματος κορυφής I(kA)
I	20	2.9
II	30	5.4
II	45	10.1
IV	60	15.7

Πίνακας 5.5 : Σχέση μεταξύ επιπέδου προστασίας, απόστασης πρόσκρουσης και τιμής κορυφής του ρεύματος [3]

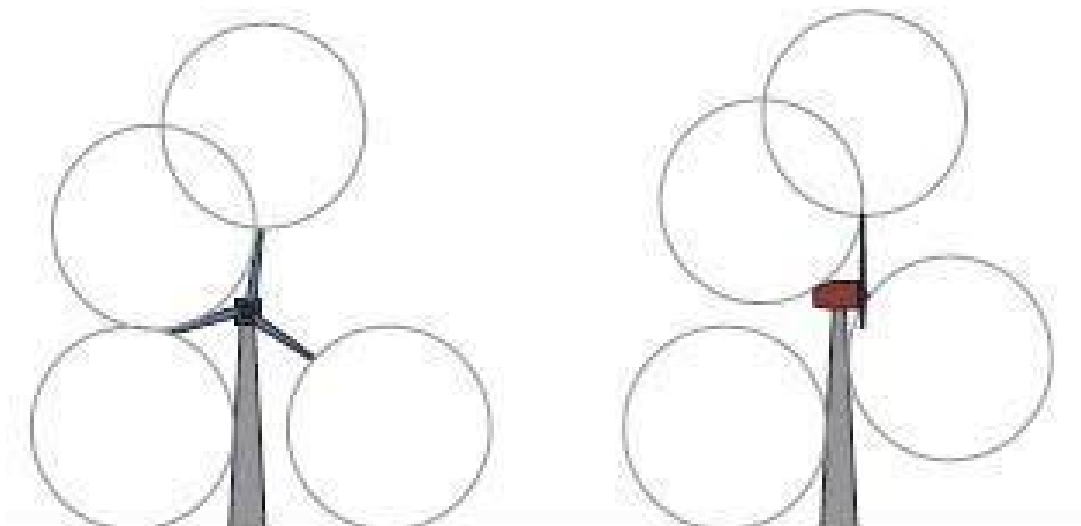
Με βάση την υπόθεση του ηλεκτρογεωμετρικού μοντέλου της κυλιόμενης σφαίρας, ανάλογα την θέση του αντικείμενου είναι απαραίτητο να συμπεριλάβουμε και τα παρακείμενα κτίρια και αντικείμενα. Επιπλέον, για κάθε επίπεδο προστασίας απαιτείται και διαφορετική ακτίνα της κυλιόμενης σφαίρας. Το κέντρο της σφαίρας είναι η άκρη του βηματοδηγού, την οποία θα συναντήσουν οι ανερχόμενοι leader. Η σφαίρα κυλιέται σε όλες τις πιθανές διευθύνσεις γύρω από το αντικείμενο και σημειώνονται τα αντίστοιχα σημεία επαφής. Αυτά τα σημεία επαφής είναι πιθανά σημεία της πρόσκρουσης, επομένως ο εξοπλισμός σύλληψης του κεραυνού θα πρέπει να εγκατασταθεί στα σημεία αυτά. Με την βοήθεια του μοντέλου αυτού γίνεται εμφανές ότι υπάρχει φυσική προστασία για κάποια σημεία, άρα τα σημεία αυτά δεν χρειάζεται να προστατευθούν.

Σε ακραία σημεία υψηλών κατασκευών όμως, έχει παρατηρηθεί να πλήττονται σημεία που δεν προσδιορίζονται από το μοντέλο της κυλιόμενης σφαίρας. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι σε πολλαπλά κεραυνικά πλήγματα η άκρη του βηματοδηγού μετατοπίζεται λόγω του ανέμου. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με το να ορίζουμε γύρω από τα σημεία αυτά μια περιοχή ακτίνας περίπου ενός μέτρου, μέσα στην οποία κεραυνικά πλήγματα είναι εξίσου πιθανό να προκύψουν.



Εικόνα 5.5 : Το μοντέλο της κυλιόμενης σφαίρας [3]

Κυλίοντας την σφαίρα γύρω από την Α/Γ βρίσκουμε τα σημεία επαφής της με την Α/Γ τα οποία είναι πιθανά σημεία που μπορεί να πλήξει ένα κεραυνικό κτύπημα. Τα σημεία όπου ο κεραυνός δεν μπορεί να πλήξει καθορίζονται από τις περιοχές που δεν ακουμπάει η κυλιόμενη σφαίρα.



Εικόνα 5.6 : Κύλιση της σφαίρας γύρω από Α/Γ με τρία πτερύγια [4]

Παρά το ότι αυτή είναι μια έγκυρη μέθοδος δεν είναι ξεκάθαρη η αποτελεσματικότητά της για ψηλές Α/Γ με πτερύγια που περιβάλλονται από μονωτικά υλικά. Τα παρακάτω σημεία σύμφωνα με το μοντέλο της κυλιόμενης σφαίρας είναι τα πιο ευάλωτα σε κεραυνικό πλήγμα. Οι αιχμηρές άκρες τους συντελούν σε σημαντική αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και επιτρέπουν τον σχηματισμό ανερχόμενων leader.

- Οι άκρες των πτερυγίων
- Το πίσω μέρος της νασέλλας (εκεί που βρίσκεται το ανεμόμετρο τα συστήματα μέτρησης ταχύτητας του ανέμου). Τα σημεία αυτά αποτελούν επίσης και σημεία εκκίνησης ανερχόμενων κεραυνών.

5.2 Σχεδίαση του συστήματος

Όπως έχει ήδη ειπωθεί, άμεσα κεραυνικά πλήγματα στην Α/Γ θα κτυπήσουν πιθανότερα τα πτερύγιά της και θα προκαλέσουν μεγάλες καταστροφές σε αυτά καθώς και σε όλα τα σημεία μιας Α/Γ που βρίσκονται στην πορεία του κεραυνικού ρεύματος (άξονας Α/Γ, έδρανα κύλισης, κιβώτιο ταχυτήτων, γεννήτρια, πύργος). Προκαλούνται επίσης σημαντικές βλάβες στα ηλεκτρονικά μέρη μιας Α/Γ όχι μόνο λόγω του άμεσου σε αυτή κεραυνικού πλήγματος αλλά και λόγω υπερτάσεων και γενικότερα επαγόμενων τάσεων εξ' αιτίας της ευρύτερης κεραυνικής δραστηριότητας σε μια περιοχή. Πρέπει επομένως μια Α/Γ να είναι προστατευμένη ώστε να αποφευχθούν και οι δομικές καταστροφές αλλά και οι βλάβες στα ηλεκτρονικά συστήματα. Γενικότερα προστασία έναντι δομικής καταστροφής για εκτεθειμένα αντικείμενα μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους. Οι σημαντικότεροι και αποτελεσματικότεροι αυτοί τρόποι είναι:

- Να υπάρχει κοντά στην κατασκευή που θέλουμε να προστατεύσουμε μια άλλη υψηλότερη αγωγίμη κατασκευή η οποία θα αποτελεί και σημείο πρόσπτωσης του κεραυνού και θα παρέχει μια περιοχή προστασίας για το εκτεθειμένο αντικείμενο. Στην πράξη σε μια Α/Γ αυτή η μέθοδος χρησιμεύει για την προστασία της νασέλλας και του ανεμομέτρου υποθέτοντας για παράδειγμα ότι τα πτερύγια με αντικεραυνική προστασία παρέχουν μια περιοχή προστασίας. Για να προστατευτούν τα πτερύγια με την μέθοδο αυτή θα αιτούνταν μια παρακείμενη κατασκευή η οποία θα έπρεπε να είναι πάρα πολύ ψηλή, κάτι εξαιρετικά δύσπρακτο. Παρόλα αυτά αυτή η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί. [5]

- Να εξασφαλιστεί ότι τα υλικά στα οποία προσπίπτει ο κεραυνός δεν θα είναι ευάλωτα σε ότι αφορά καταστροφές από το ηλεκτρικό τόξο που οφείλονται όχι μόνο στο υψηλής έντασης ρεύμα του τόξου αλλά και στις επιδράσεις του εν γένει.
- Να προβλέπεται αγωγίμος δρόμος επαρκούς διατομής ώστε να άγει το παραγόμενο από τον κεραυνό ρεύμα με ασφάλεια στο έδαφος. Αν υπάρχουν κατασκευές με μεγάλη ωμική αντίσταση όπως για παράδειγμα πτερύγια με ίνες άνθρακα τα οποία θα μπορούσαν να καταστραφούν από υψηλά ρεύματα τότε απαιτούνται παράλληλοι αγωγοί. Έτσι η ενέργεια στο προσβεβλημένο συστατικό του πτερυγίου (π.χ. ίνες άνθρακα) θα είναι πολύ πιο μειωμένη.

5.2.1 Ζώνες αντικεραυνικής προστασίας [1]

Ένα σημαντικό βήμα για τον σχεδιασμό της αντικεραυνικής προστασίας, είναι ο χωρισμός της ανεμογεννήτριας σε ζώνες. Με τον τρόπο αυτόν εξασφαλίζεται συστηματική και αποτελεσματική προστασία όλων των στοιχείων της ανεμογεννήτριας. Οι ζώνες αντικεραυνικής προστασίας (LPZ) ορίζονται ανάλογα με το αν είναι πιθανή μία άμεση πτώση κεραυνού, εξαρτάται από το μέγεθος του κεραυνικού ρεύματος και του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που αναμένεται στην ζώνη αυτή, ενώ πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και η αρχιτεκτονική της κατασκευής της ανεμογεννήτριας. Στον πίνακα 5.6 παρουσιάζεται ο τρόπος καθορισμού των ζωνών προστασίας.

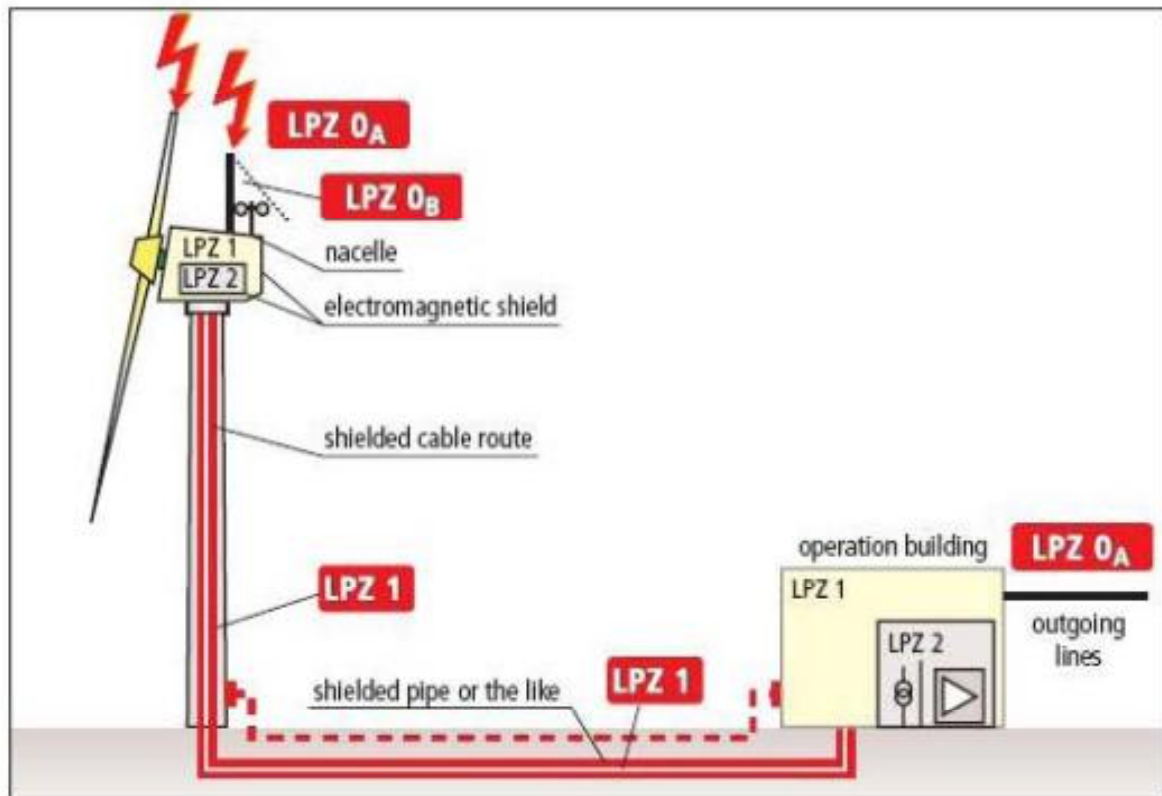
LPZ 0_A	Στοιχεία εκτεθειμένα σε άμεσο κεραυνικό πλήγμα, πλήρες ρεύμα κεραυνού, ισχυρό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο
LPZ 0_B	Στοιχεία μη εκτεθειμένα σε άμεσο κεραυνικό πλήγμα, πλήρες ρεύμα κεραυνού, ισχυρό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο
LPZ 1	Στοιχεία μη εκτεθειμένα σε άμεσο κεραυνικό πλήγμα, μειωμένο ρεύμα κεραυνού, εξασθενημένο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο
LPZ 2	Ακόμη πιο μειωμένο ρεύμα κεραυνού, ακόμη εξασθενημένο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο

Πίνακας 5.6 : Ζώνες αντικεραυνικής προστασίας [1]

Στην εικόνα 5.7 φαίνεται ο χωρισμός της ανεμογεννήτριας σε ζώνες προστασίας. Όπως παρατηρούμε τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας και γενικά κάθε στοιχείο που είναι εκτεθειμένο σε άμεσο κεραυνικό πλήγμα ανήκει στην ζώνη 0A. Στην κορυφή της νασέλλας όπου τοποθετούνται ακίδες αλεξικέραυνων, δημιουργείται μία ζώνη LPZ 0B, όπου τα μετεωρολογικά όργανα πρέπει να προστατευθούν. Τα στοιχεία της ανεμογεννήτριας που βρίσκονται στο εσωτερικό της νασέλλας, δεν πρέπει να είναι εκτεθειμένα σε άμεσο πλήγμα κεραυνού. Γι' αυτό η νασέλλα έχει μεταλλικό κάλυμμα (κλωβός Faraday). Αν το κάλυμμα της νασέλλας είναι από GRP συνιστάται η ενσωμάτωση σε αυτό ενός μεταλλικού πλαισίου, που συνδέεται με προσοχή στην βάση της νασέλλας, έτσι ώστε τα εσωτερικά στοιχεία να μην είναι εκτεθειμένα σε άμεσο κεραυνικό πλήγμα (δηλαδή τουλάχιστον ζώνη LPZ 0B).

Ακόμη ιδανικότερα, ένα μεταλλικό πλέγμα στο κάλυμμα της νασέλλας πρέπει να τοποθετηθεί μέσα στο πλαίσιο που αναφέρθηκε προηγουμένως, ώστε να οριστεί το εσωτερικό της νασέλλας σαν ζώνη LPZ 1. Ωστόσο κάποιες συσκευές που διαθέτουν ηλεκτρομαγνητική θωράκιση (μεταλλικό κάλυμμα), κατατάσσονται σε ζώνη

προστασίας LPZ 2. Ο πύργος και ο χώρος στον οποίο είναι τοποθετημένος ο μετασχηματιστής βρίσκονται σε ζώνη LPZ 1, ενώ ο ίδιος ο Μ/Σ που περικλείεται από μεταλλικό κάλυμμα, κατατάσσεται σε ζώνη προστασίας LPZ 2.



Εικόνα 5.7 : Ζώνες προστασίας της ανεμογεννήτριας. [6]

5.2.1.1 Αντικεραυνική προστασία πτερυγίων [9],[13]

Για το σύστημα της αντικεραυνική προστασία των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας θα πρέπει να τηρούνται κάποιες προδιαγραφές:

- Να είναι ικανό να διασκορπίζει την ενέργεια που μεταδίδεται από τον κεραυνό χωρίς να προκαλούνται επιβλαβείς επιπτώσεις για το προσωπικό, την κατασκευή και τα όργανα της ανεμογεννήτριας.
- Το κόστος της εγκατάστασης και της συντήρησής του να μην είναι μεγάλο.
- Να είναι συμβατό με την κατασκευή των πτερυγίων και να μην δημιουργεί προβλήματα στην ορθή λειτουργία τους.

- Να είναι σε θέση να αντέχει σε επαναλαμβανόμενα κεραυνικά πλήγματα.
- Να είναι εύκολο να επιδιορθωθεί και να επισκευαστεί σε περίπτωση βλάβης του.

Η αντικεραυνική προστασία των πτερυγίων θα πρέπει να στοχεύει στο να οδηγεί το ρεύμα του κεραυνού από το σημείο πρόσπτωσης ως τη πλήμνη περιστροφής με σκοπό την αποφυγή δημιουργίας τόξου στο εσωτερικό του πτερυγίου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί εκτρέποντας το παραγόμενο από το κεραυνό ρεύμα απ' το σημείο πρόσπτωσης κατά μήκος της επιφάνειας προς τη ρίζα του πτερυγίου, χρησιμοποιώντας μεταλλικούς αγωγούς είτε ενσωματωμένους στην επιφάνεια του πτερυγίου είτε κατά μήκος του άκρου του. Μια άλλη μέθοδος είναι η προσθήκη αγώγιμου υλικού στο ίδιο το υλικό της επιφάνειας του πτερυγίου κατά τρόπο που να καθιστά το πτερύγιο ικανοποιητικά αγώγιμο για την ασφαλή διέλευση του ρεύματος του κεραυνού στη βάση του πτερυγίου.

Τα πτερύγια που κατασκευάζονται από αγώγιμα υλικά όπως ο χάλυβας και το ατσάλι παρόλο που και αυτά υφίστανται ζημιές από πλήγμα κεραυνού παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά όσον αφορά την αντικεραυνική προστασία τους. Αυτό οφείλεται στο ότι το κεραυνικό ρεύμα θα καταλήξει στη πλήμνη χωρίς να παρέμβει στη γεννήτρια, στο εσωτερικό δηλαδή της ανεμογεννήτριας. Παρά το γεγονός όμως αυτό πτερύγια από τέτοιου είδους υλικό πλέον δεν χρησιμοποιούνται συχνά.

Τους διάφορους τρόπους αντικεραυνικής προστασίας των πτερυγίων θα μπορούσαμε να τους κατηγοριοποιήσουμε με το αν το πτερύγιο διαθέτει ή δεν διαθέτει φρένο άκρης.

Πτερύγια χωρίς φρένο άκρης

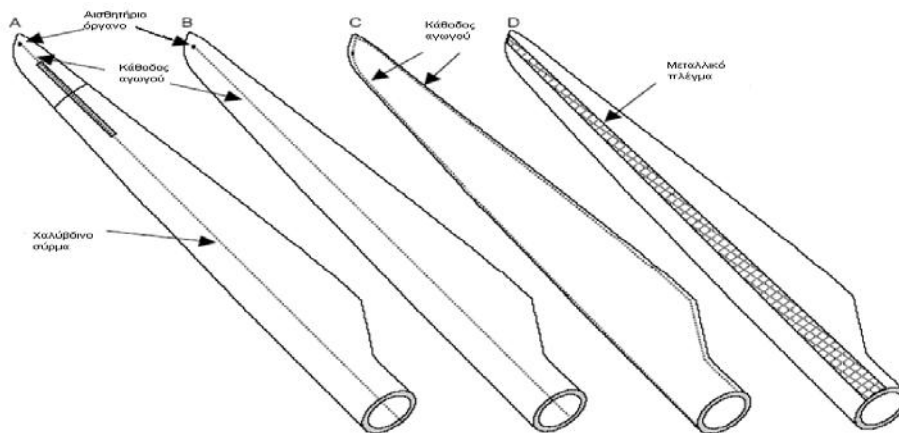
- Καμία προστασία
- Εξωτερικό μεταλλικό κάλυμμα στην άκρη και μεταλλικό δίχτυ / πλέγμα στην επιφάνεια
- Παραλήπτες στην άκρη συνδεδεμένοι με εσωτερικό αγωγό που καταλήγει στη γη

Πτερύγια με φρένο άκρης

- Καμία ιδιαίτερη προστασία αλλά χρήση του εσωτερικού αγώγιμου καλωδίου του φρένου και του άξονα του φρένου από ίνες άνθρακα
- Παραλήπτες στην άκρη του πτερυγίου, εσωτερικός αγωγός μέσα στον άξονα του

φρένου και σύνδεση με το καλώδιο ελέγχου

•Στενή και λεπτή αγωγίμη ταινία κατά μήκος του χείλους εκφυγής.



Εικόνα 5.8: Αντικεραυνική προστασία μεγάλων σύγχρονων πτερυγίων Α/Γ [1]

5.2.1.2 Σύστημα σύλληψης κεραυνού στην επιφάνεια του πτερυγίου[9],[13]

Οι μεταλλικοί αγωγοί στην επιφάνεια του πτερυγίου που εξυπηρετούν σαν στοιχεία του συστήματος σύλληψης του κεραυνού ή συστήματος καθόδου πρέπει να έχουν διαφορετική διατομή ώστε να είναι σε θέση να αντέξουν ένα άμεσο χτύπημα κεραυνού και επιπλέον να άγουν όλο το κεραυνικό ρεύμα. Επιπλέον απαιτούνται ορισμένες και ακριβείς διαστάσεις προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική και αξιόπιστη ενσωμάτωσή τους στην επιφάνεια του πτερυγίου. Η ελάχιστη διατομή για αλουμίνιο είναι 50mm^2 και η επίτευξη αξιόπιστης ενσωμάτωσης τέτοιου τύπου αγωγών μπορεί να είναι προβληματική. Επιπλέον οι αγωγοί που επικολλούνται στην επιφάνεια του πτερυγίου μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά την αεροδυναμική του πτερυγίου ή ακόμη να παράγουν ανεπιθύμητο θόρυβο.

5.2.1.3 Σύστημα σύλληψης κεραυνού στο εσωτερικό της επιφάνειας του πτερυγίου [9],[13]

Για τους αγωγούς που εμφυτεύονται μέσα στο πτερύγιο μπορούν να χρησιμοποιηθούν καλώδια ή μεταλλικά πλέγματα είτε από αλουμίνιο είτε από χαλκό.

Επίσης υπάρχουν διάφορα συστήματα προστασίας όπου μεταλλικός αγωγός συνδεδεμένος στη βάση του πτερυγίου τοποθετείται είτε στην επιφάνεια του φτερού κατά μήκος του χείλους εκφυγής είτε εμφυτεύονται στο εσωτερικό τη ίδια διαδρομή. Ορισμένες κατασκευές πτερυγίου αποτελούνται από μεταλλικούς αγωγούς τοποθετημένους κατά μήκος τόσο του χείλους εκφυγής όσο και του χείλους προσβολής (τύπος C). Επιπλέον κάποιες κατασκευές διαθέτουν παραλήπτες τοποθετημένους στην επιφάνεια γύρω από το πτερύγιο σε διάφορες θέσεις κατά μήκος του πτερυγίου, κάθε ένας από τους οποίους συνδέεται με τους αγωγούς κατά μήκος των άκρων του πτερυγίου. Μια λύση στα προβλήματα που δημιουργούνται με τους αγωγούς που τοποθετούνται στην επιφάνεια του πτερυγίου είναι η τοποθέτησή τους μέσα στο πτερύγιο. Τα μεταλλικά προσαρτήματα για τον αγωγό διαπερνούν την επιφάνεια του πτερυγίου και εξυπηρετούν ως ιδιαίτεροι παραλήπτες του κεραυνού. Τέτοιο αντικεραυνικό σύστημα χρησιμοποιείται στα αεροσκάφη. Το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας που χρησιμοποιείται σε πολλά πτερύγια σήμερα από τους κατασκευαστές διαθέτει τέτοιους μικρούς παραλήπτες τοποθετημένους στην άκρη του πτερυγίου (τύποι A και B). Από τους παραλήπτες στην άκρη, ένα εσωτερικό σύστημα αγωγών οδηγεί προς τα κάτω το παραγόμενο ρεύμα, προς τη βάση του πτερυγίου. Για τα πτερύγια με φρένο άκρης, το χαλύβδινο καλώδιο που ελέγχει την κινούμενη άκρη χρησιμοποιείται σαν αγωγός καθόδου (τύπος A). Αν το πτερύγιο δεν διαθέτει σύστημα φρένου άκρης, τότε ένα καλώδιο χαλκού τοποθετημένο κατά μήκος του εσωτερικού δοκαριού χρησιμοποιείται σαν αγωγός καθόδου προς τη βάση του πτερυγίου (τύπος B). Τα τελευταία χρόνια έχουν παραχθεί αρκετές χιλιάδες πτερύγια με αυτό το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας. Οι πιο πρόσφατες εμπειρίες με αυτή την αντικεραυνική προστασία για πτερύγια μήκους ως 20m είναι πολύ ελπιδοφόρες.

5.2.1.4 Συγκολλητικές μεταλλικές ταινίες [9],[13]

Οι συγκολλητικές μεταλλικές ταινίες που τοποθετούνται στην επιφάνεια του φτερού έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορες περιπτώσεις. Παρ' όλα αυτά τέτοιες ταινίες έτειναν να αποκολληθούν μέσα σε λίγους μήνες. Θεωρώντας ότι το πρόβλημα της συγκράτησης της ταινίας στο πτερύγιο μπορεί να λυθεί, είναι πιθανό οι μεταλλικές ταινίες να αποτελέσουν μια ενδιαφέρουσα μέθοδο προστασίας, ειδικά στα υπάρχοντα μη προστατευμένα πτερύγια. Θα πρέπει όμως να σημειωθεί

ότι τα μεγάλα κύματα πίεσης που συνδέονται με την καθοδήγηση του κεραυνού πλησίον της επιφάνειας του πτερυγίου μπορούν να οδηγήσουν σε δομική καταστροφή.

5.2.1.5 Αγωγή υλικά της επιφάνειας του πτερυγίου [9],[13]

Μια εναλλακτική λύση του συστήματος σύλληψης του κεραυνού που τοποθετείται στην επιφάνεια του πτερυγίου, είναι να γίνει η ίδια η επιφάνεια αγωγήμη. Στη βιομηχανία των αεροσκαφών η αντικεραυνική προστασία των συνθετικών υλικών από ίνες γυαλιού και άνθρακα για τα πτερύγια και τις επιφάνειες που εκτίθενται σε κεραυνούς επιτυγχάνεται προσθέτοντας αγωγήμο υλικό στα εξωτερικά στρώματα και έτσι με αυτόν τον τρόπο να περιορίζεται η φθορά σε μια μικρή περιοχή απ' το σημείο προσκόλλησης του κεραυνού. Το αγωγήμο υλικό μπορεί να είναι μέταλλο που ψεκάζεται πάνω στην επιφάνειά του, ίνες με μεταλλική επίστρωση στα εξωτερικά στρώματα του συνθετικού υλικού, μεταλλικό καλώδιο που υφαίνεται στα εξωτερικά στρώματα του συνθετικού υλικού ή μεταλλικά πλέγματα που τοποθετούνται ακριβώς κάτω απ' την επιφάνεια. Η αντικεραυνική προστασία των πτερυγίων των ανεμογεννητριών έχει γίνει με μεταλλικό πλέγμα τοποθετημένο κατά μήκος των πλευρών των πτερυγίων ακριβώς κάτω από τη ζελατινώδη στρώση(συνθετικό επίστρωμα της επιφάνειας του πτερυγίου). Κάποιες φορές η πιο απομακρυσμένη άκρη του πτερυγίου είναι κατασκευασμένη είτε από μέταλλο είτε καλυμμένη με μεταλλικό φύλλο. Πρέπει βέβαια να τονιστεί ότι κάθε υλικό στην εξωτερική επιφάνεια του πτερυγίου είναι ευάλωτο σε αποσάθρωση λόγω διάβρωσης και από τη στιγμή που υπάρχει απαίτηση να είναι λεπτό για αεροδυναμικούς λόγους οποιαδήποτε φθορά αποτελεί πρόβλημα.

5.2.1.6 Αποτελεσματικότητα σύλληψης του κεραυνού [9],[13]

Η αποτελεσματικότητα σύλληψης είναι ένα ζήτημα με τις μεθόδους αντικεραυνικής προστασίας που εφαρμόζουν συστήματα διακριτών παραληπτών του κεραυνού, τοποθετημένους στην επιφάνεια του πτερυγίου. Οι στερεοί αγωγοί στην επιφάνεια και οι παραλήπτες που διεισδύουν σ' αυτήν πρέπει να τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε η πιθανότητα πρόσπτωσης του κεραυνού στο απροστάτευτο τμήμα της επιφάνειας να μειωθεί σε αποδεκτό επίπεδο. Η

απόσταση των παραληπτών που δίνουν μια αποτελεσματικότητα σύλληψης ίση με αυτήν των στερεών αγωγών, θα ήταν θεωρητικά το διάστημα όπου η επιφανειακή τάση διάσπασης κατά μήκος της επιφάνειας του αγωγού είναι μικρότερη απ' τη τάση διάσπασης του επιφανειακού υλικού του περυγίου. Ωστόσο στη πράξη επιδρούν πολλοί παράγοντες όπως επιρροή της γήρανσης, των ρωγμών, της υγρασίας και της ρύπανσης. Επιπλέον η αποτελεσματικότητα σύλληψης των παραληπτών και των άλλων στοιχείων θα επηρεάζεται απ' την παρουσία των αγωγιμων υλικών μέσα στο περύγιο. Αυτή είναι συγκεκριμένα και η περίπτωση όπου υπάρχουν γωνίες και άκρες στο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας, σημεία επιρρεπή σε ισχυρές παραμορφώσεις και αυξήσεις του ηλεκτρικού πεδίου. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ανερχόμενους leader από τα σημεία αυτά αντί τους παραλήπτες. Κοιλότητες αέρα πάνω από τον αγωγό μπορεί να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητες εκκενώσεις και κατά συνέπεια σε ανερχόμενες εκκενώσεις.

5.2.1.7 Διαστάσεις των υλικών που χρησιμοποιούνται για την αντικεραυνική προστασία των περυγίων [9],[12],[13]

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην αντικεραυνική προστασία των περυγίων των ανεμογεννητριών θα πρέπει να είναι ικανά να αντέξουν και να αντισταθούν στις ηλεκτρικές, θερμικές και ηλεκτροδυναμικές πιέσεις και καταπονήσεις που επιβάλλονται απ' το κεραυνικό ρεύμα. Οι ελάχιστες διαστάσεις των υλικών που χρησιμοποιούνται σαν στοιχεία σύλληψης του κεραυνού καθώς και αγωγοί καθόδου παρουσιάζονται στο πίνακα 5.7.

Υλικό	Ηλεκτρόδια σύλληψης[mm ²]	Αγωγός καθόδου[mm ²]
Χαλκός	35	16
Αλουμίνιο	70	25
Χάλυβας	50	50

Πίνακας 5.7: Ηλεκτρόδια σύλληψης και αγωγοί καθόδου που χρησιμοποιούνται σαν στοιχεία σύλληψης του κεραυνού

Στο πίνακα 5.8 βλέπουμε τις διαστάσεις που λαμβάνουν υπόψη τις ηλεκτρικές και

ηλεκτροδυναμικές επιδράσεις και προβλέπουν τυχαίες καταπονήσεις και οι οποίες έχουν μελετηθεί και συμπεριληφθεί στο IEC Technical Committee 81's (IEC 62305). Με λίγα λόγια περιγράφουμε τις προτεινόμενες διαστάσεις υλικών αντικεραυνικής προστασίας.

Υλικό	Μορφή	Ελάχιστη διατομή [mm ²]
Χαλκός	Στερεά ταινία	50
	Συμπαγείς ράβδοι	50
	Πλεγμένο καλώδιο	50
	Συμπαγείς ράβδοι για σύλληψη	200
Κράμα αλουμινίου	Στερεά ταινία	50
	Συμπαγείς ράβδοι	50
	Πλεγμένο καλώδιο	50
	Συμπαγείς ράβδοι για σύλληψη	200
Γαλβανισμένος εν θερμό χάλυβας	Στερεά ταινία	50
	Συμπαγείς ράβδοι	50
	Πλεγμένο καλώδιο	50
	Συμπαγείς ράβδοι για σύλληψη	200
Ανοξειδωτος χάλυβας	Στερεά ταινία	60
	Συμπαγείς ράβδοι	75
	Πλεγμένο καλώδιο	60
	Συμπαγείς ράβδοι για σύλληψη	200
Αλουμίνιο	Στερεά ταινία	70
	Συμπαγείς ράβδοι	50
	Πλεγμένο καλώδιο	50

Πίνακας 5.8: Διαστάσεις που λαμβάνουν υπόψη τις ηλεκτρικές και ηλεκτροδυναμικές επιδράσεις

Τα μέρη υπό φορτίο όπως τα χαλύβδινα καλώδια για το φρένο των άκρων πρέπει να είναι ακόμη περισσότερο ανθεκτικά, καθώς η μηχανική αντοχή μειώνεται αν αυτό θερμανθεί σε υψηλές θερμοκρασίες. Έχει παρατηρηθεί ότι τα χαλύβδινα καλώδια για το φρένο άκρης έχουν σπάσει ή λιώσει εξαιτίας του παραγόμενου ρεύματος ακόμη και για τα καλώδια διαμέτρου έως 100mm (διατομή 78mm²). Η ανύψωση της θερμοκρασίας των αγωγών που μεταφέρουν το κεραυνικό ρεύμα μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση (IEC 61819): [32]

$$\theta - \theta_0 = \frac{1}{\alpha} \cdot \left\{ \exp \left[\frac{(W / R \cdot \alpha \cdot \rho_0)}{q^2 \cdot \gamma \cdot c_w} \right] - 1 \right\}$$

όπου,

$\theta - \theta_0$: η ανύψωση της θερμοκρασίας των αγωγών (K)

α : ο συντελεστής αντίστασης (1/ K)

W/R : η ενέργεια του παλμού του ρεύματος (J/Ω)

ρ_0 : η ωμική αντίσταση του αγωγού σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (Ωm)

q : η διατομή του αγωγού (m²)

γ : η πυκνότητα του υλικού (kg/m³)

c_w : η θερμοχωρητικότητα (J/kgK)

5.2.1.8 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διαφόρων μεθόδων αντικεραυνικής προστασίας των πτερυγίων [15]

Δικτυωτό πλέγμα στην άκρη του πτερυγίου



Εικόνα 5.9: Δικτυωτό πλέγμα στην άκρη του πτερυγίου [15]

Πλεονεκτήματα:

- Η δημιουργία του πλέγματος στην επιφάνεια είναι σχετικά απλή
- Δεν παρατηρείται εκκένωση διαμέσου της δομής του πτερυγίου
- Προστασία ολόκληρου του πτερυγίου

Μειονεκτήματα:

- Είναι δυνατόν να καταστραφεί η δομή του πλέγματος
- Η επισκευή και η αντικατάσταση είναι δύσκολο να γίνουν

Μεταλλικό κάλυμμα στην άκρη του πτερυγίου



Εικόνα 5.10: Μεταλλικό κάλυμμα στην άκρη του πτερυγίου [15]

Πλεονεκτήματα:

- Σχετικά περιορισμένες φθορές
- Είναι δυνατή η αντικατάστασή του

Μειονεκτήματα:

- Δαπανηρή κατασκευή και στερέωση στις ίνες γυαλιού (υλικό των περισσότερων πτερυγίων)
- Η ικανότητα διοχέτευσης του ρεύματος πρέπει να είναι διασφαλισμένη

Παραλήπτες σε διάφορες θέσεις κατά μήκος του πτερυγίου



Εικόνα 5.11: Παραλήπτες σε διάφορες θέσεις κατά μήκος του πτερυγίου [15]

Πλεονεκτήματα:

- Σχετικά περιορισμένες φθορές

Μειονεκτήματα:

- Μικρή επιφάνεια σύλληψης
- Δαπανηρή κατασκευή και στερέωση στις ίνες γυαλιού (υλικό των περισσότερων πτερυγίων)
- Η ικανότητα διοχέτευσης του ρεύματος πρέπει να είναι διασφαλισμένη

Μεταλλικοί αγωγοί στο πτερύγιο



Εικόνα 5.12: Μεταλλικοί αγωγοί στο πτερύγιο [15]

Πλεονεκτήματα:

- Σχετικά περιορισμένες φθορές
- Δεν παρατηρείται εκκένωση διαμέσου της δομής του πτερυγίου προς το εσωτερικό του
- Επιπρόσθετη προστασία και των πλευρικών τμημάτων

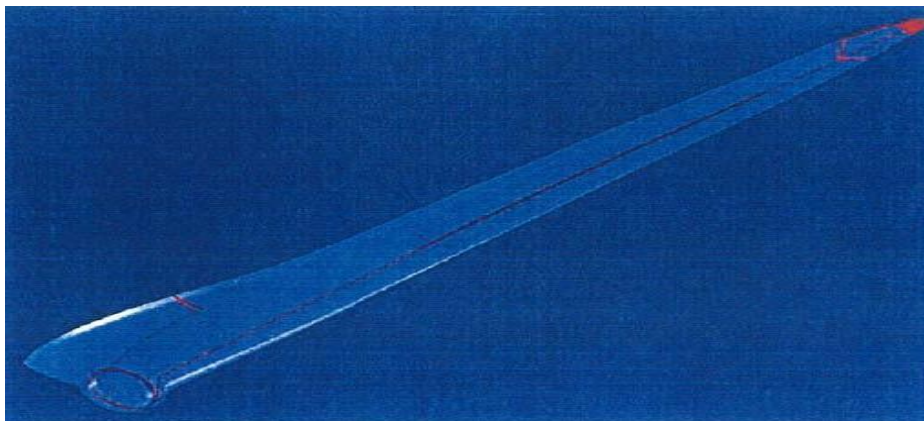
Μειονεκτήματα:

- Δαπανηρή κατασκευή και στερέωση στις ίνες γυαλιού (υλικό των περισσότερων πτερυγίων)
- Δύσκολη αντικατάσταση
- Απαραίτητη η ανοχή τους κατά την λειτουργία

5.2.1.9 Σύνδεση των πτερυγίων με την πλήμνη περιστροφής και την νασέλλα της ανεμογεννήτριας [16]

Στην άκρη του πτερυγίου το σύστημα οδήγησης του ρεύματος προς τα κάτω έχει συνήθως το τελείωμά του είτε στη χαλύβδινη φλάντζα της βάσης είτε στην πλήμνη. Αν το πτερύγιο έχει ρύθμιση περιστροφής του βήματος του προβλέπεται κάποια σύνδεση πάνω από το έδρανο, όπως κάποια επαφή που κυλιέται ή κάποιο εύκαμπτο καλώδιο που δεν εμποδίζει την κίνηση της περιστροφής του πτερυγίου. Η εύκαμπτη αυτή σύνδεση πέρα απ' το έδρανο μπορεί να συνδυαστεί με το εσωτερικό τμήμα του αγωγού οδήγησης στο πτερύγιο. Στα πτερύγια με φρένο άκρης

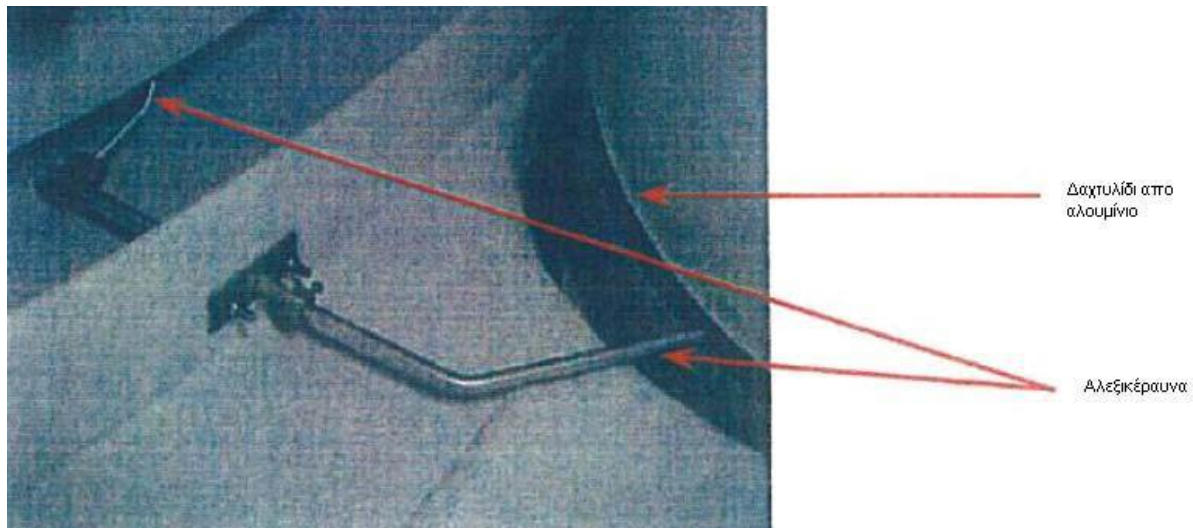
το υδραυλικό σύστημα που θέτει σε εφαρμογή το καλώδιο ελέγχου πρέπει να προστατευθεί. Οι υδραυλικοί κύλινδροι που συνήθως χρησιμοποιούνται μπορεί να καταστραφούν από ανάφλεξη που ξεκινά απ' την εσωτερική τους ράβδο, στο περίβλημα και το σώμα του κυλίνδρου. Συνήθως ο κύλινδρος του υδραυλικού συστήματος προστατεύεται παρεκκλίνοντας το ρεύμα μέσω ενός εύκαμπτου συνδετικού λουριού που επιτρέπει την κίνηση του υπόλοιπου συστήματος. Προσοχή πρέπει να δοθεί στην μείωση της χαλαρότητας αυτών των συνδετικών λουριών, δεδομένου ότι η πτώση τάσης με αυτεπαγωγή μπορεί να γίνει πολύ υψηλή με συνέπεια την ανεπαρκή προστασία του κυλίνδρου. Γύρω από τη ρίζα του πτερυγίου πολλές φορές υπάρχει ένα δαχτυλίδι από αλουμίνιο που είναι συνδεδεμένο με τον εσωτερικό αγωγό της αντικεραυνικής προστασίας. Το δαχτυλίδι αυτό είναι προσαρμοσμένο έτσι ώστε να υπάρχει επαρκής απόσταση από τα μεταλλικά μέρη στη περιοχή σύνδεσης με το πτερύγιο. Το γεγονός αυτό βοηθά στο να αποτρέπονται ανεπιθύμητες εκκενώσεις κατά την διάρκεια κεραυνικού πλήγματος καθώς και να διασκορπίζεται το ρεύμα. Τα έδρανα (κύλιση και στάσιμα) έτσι είναι προστατευμένα από φθορές λόγω κεραυνού επειδή ο διασκορπισμός του ρεύματος λαμβάνει μέρος στη ρίζα του πτερυγίου και όχι διαμέσου της πλήμνης και των εδράνων.



Εικόνα 5.13: Σχεδιασμός αντικεραυνικής προστασίας πτερυγίου [16]

Όσον αφορά την διαδρομή του ρεύματος από τα πτερύγια προς τη νασέλλα χρησιμοποιούνται πολλές φορές διάκενα τα οποία σχηματίζονται με ράβδους στη νασέλλα και με δαχτυλίδι από αλουμίνιο στο τέλος του πτερυγίου. Υπάρχει μία

ράβδος για κάθε πτερύγιο η οποία έχει μια κωνική άκρη με σκοπό να αυξάνεται στη περιοχή της άκρης η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε σχέση με τις γύρω περιοχές ώστε να δημιουργείται σπινθήρας στο διάκενο. Μετά το ρεύμα άγεται προς τη νασέλλα και μέσω των ολισθαινόντων οδηγών προς τον πύργο.



Εικόνα 5.14: Σχηματισμός διακένου για την όδευση του ρεύματος προς τη νασέλλα [16]

5.2.1.10 Δοκιμές σε πτερύγια με σύστημα αντικεραυνικής προστασίας [17]

Παρακάτω υπάρχουν αναλυτικά οι δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί σε πτερύγια ανεμογεννητριών με τέσσερα διαφορετικά συστήματα αντικεραυνικής προστασίας τα οποία είναι:

- Δοκιμές σε πτερύγια με παραλήπτη
- Δοκιμές σε πτερύγια με μεταλλικό κάλυμμα
- Δοκιμές σε πτερύγια με φρένο άκρης
- Δοκιμές σε πτερύγια με αγωγίμο επικαλυπτικό στρώμα

Δοκιμές σε πτερύγια με παραλήπτη [17]

Έχουν πραγματοποιηθεί δοκιμές με κρουστικές υψηλές τάσεις σε τμήματα πτερυγίων κατασκευασμένα από γυαλί ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (GRP). Τα πτερύγια αυτά

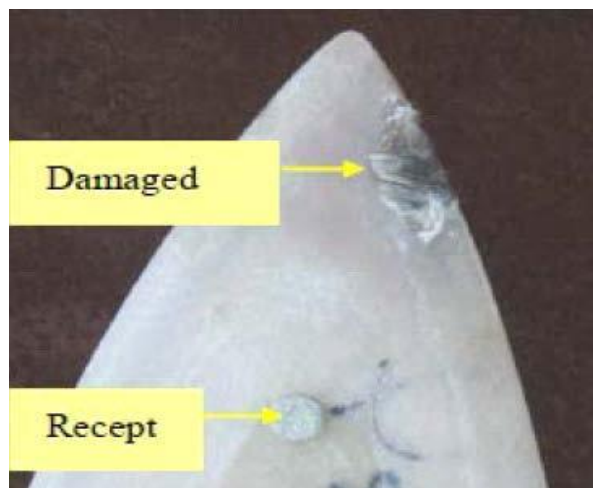
είναι εφοδιασμένα με σύστημα αντικεραυνικής προστασίας, το οποίο συνιστάται από έναν χάλκινο παραλήπτη προσαρμοσμένο στην επιφάνεια του φτερού κοντά στη κορυφή του και συνδεδεμένο με εσωτερικό αγωγό καθόδου, ο οποίος έχει σύνδεση με τη γη. Οι δοκιμές διεξήχθησαν με διαφορετικές χωρικές διευθετήσεις του τμήματος του πτερυγίου όπως κάθετα, με γωνία 45 ως προς το έδαφος και οριζόντια. Στη περίπτωση της κάθετης και μετά από επαναλαμβανόμενες δοκιμές παρατηρήθηκε ότι σε πολλές περιπτώσεις η εκκένωση διαδίδονταν κατά μήκος της επιφάνειας της κορυφής του πτερυγίου και προσκολλούσε στον παραλήπτη. Μερικές φορές περνούσε δια μέσου του αέρα και προσκολλούσε κατ' ευθείαν στον παραλήπτη. Όταν η εκκένωση κατέληγε στην κορυφή της άκρης του πτερυγίου στη διαδρομή της προς τον παραλήπτη κατέστρεφε τμήμα της άκρη. Στη περίπτωση της τοποθέτησης με γωνία 45 ως προς το έδαφος δεν παρατηρήθηκε καμία καταστροφή μετά από επαναλαμβανόμενες δοκιμές. Τις περισσότερες φορές η εκκένωση διαδιδόταν κατά μήκος της επιφάνειας του πτερυγίου και προσκολλούσε στον παραλήπτη. Όταν το πτερύγιο τοποθετούνταν οριζόντια στην περίπτωση αρνητικής κρουστικής τάσης ο παραλήπτης μπορούσε να διακόψει επιτυχώς την εκκένωση πολλές φορές. Στην περίπτωση όμως της θετικής κρουστικής τάσης η εκκένωση διαπερνούσε το πτερύγιο περίπου από τη μέση του και συνέχιζε προς τον παραλήπτη και τέλος προσκολλούνταν στον αγωγό καθόδου. Στις παρακάτω τρεις φωτογραφίες βλέπουμε τη συμπεριφορά της εκκένωσης σε πτερύγιο που είναι τοποθετημένο κάθετα με τον παραλήπτη.



Εικόνα 5.15: Μπροστινή όψη πτερυγίου [17]



Εικόνα 5.16: Δεξιά όψη πτερυγίου [17]



Εικόνα 5.17: Πληγείσα περιοχή πτερυγίου [17]

Στις παρακάτω τρεις φωτογραφίες βλέπουμε τη συμπεριφορά της εκκένωσης σε πτερύγιο που είναι τοποθετημένο οριζόντια με τον παραλήπτη.



Εικόνα 5.18: Μπροστινή όψη πτερυγίου [17]



Εικόνα 5.19: Δεξιά όψη πτερυγίου [17]



Εικόνα 5.20: Πληγείσα περιοχή πτερυγίου [17]

Δοκιμές σε πτερύγια με μεταλλικό κάλυμμα [17]

Εκτός από το παραπάνω τρόπο αντικεραυνικής προστασίας με τον παραλήπτη στην επιφάνεια του πτερυγίου χρησιμοποιείται επίσης σαν μέθοδος προστασίας και με ένα μεταλλικό κάλυμμα στη κορυφή του πτερυγίου συνδεδεμένο με έναν αγωγό καθόδου που καταλήγει στη γη. Σε δοκιμές που διεξήχθησαν σε πτερύγια με αυτό το σύστημα προστασίας παρατηρήθηκε ότι η εκκένωση κατέληγε απ' ευθείας στο αγωγίμο κάλυμμα και το κεραυνικό ρεύμα οδηγούνταν με ασφάλεια στο έδαφος δια μέσου του αγωγού καθόδου. Παρ' όλα αυτά όμως σε κάποιες περιπτώσεις παρατηρήθηκε ότι η εκκένωση προσκολλούσε στη κορυφή του πτερυγίου ακριβώς κάτω από το μεταλλικό κάλυμμα. Παρά το ότι προκαλούνται και με αυτήν την μέθοδο φθορές στο πτερύγιο, η μέθοδος αυτή παρέχει ένα σχετικά υψηλότερο επίπεδο προστασίας σε σχέση με τη μέθοδο με τον παραλήπτη.

Στις παρακάτω τρεις φωτογραφίες βλέπουμε τη συμπεριφορά της εκκένωσης σε πτερύγιο με μεταλλικό κάλυμμα



Εικόνα 5.21: Χτύπημα στο μεταλλικό κάλυμμα του πτερυγίου [17]



Εικόνα 5.22: Χτύπημα στην άκρη του πτερυγίου[17]



Εικόνα 5.23: Πληγείσα περιοχή [17]

Δοκιμές σε πτερύγια με φρένο άκρης [10]

Δοκιμές έχουν πραγματοποιηθεί σε πτερύγια με φρένο άκρης, με το φρένο άκρης να έχει ήδη κινηθεί προς τα έξω και να έχει περιστραφεί κατά 90 με συνέπεια ένα μέρος του άξονα του φρένου να είναι εκτεθειμένο. Στα πτερύγια αυτά το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας αποτελούνταν από έναν εσωτερικό αγωγό που περνά δια μέσου του άξονα του φρένου. Στο πτερύγιο είναι τοποθετημένα κάποια στοιχεία στήριξης για να εξασφαλίζεται η σωστή λειτουργία του φρένου άκρης. Τα στοιχεία αυτά δεν συνδέονται με τη γη ενώ το περίβλημα του αισθητήρα συνδέεται με τη γη. Δοκιμές με κρουστικές υψηλές τάσεις έδειξαν ότι όταν το ηλεκτρόδιο βρισκόταν πολύ κοντά στον παραλήπτη τότε ο παραλήπτης αποτελούσε και το σημείο προσκόλλησης της εκκένωσης. Όταν όμως το ηλεκτρόδιο βρισκόταν στο επίπεδο του κυρίως σώματος του πτερυγίου όλες οι εκκενώσεις προσκολλούσαν σε μέρη του μηχανισμού του φρένου άκρης. Σε λίγες περιπτώσεις πλήττονταν ο άξονας του φρένου ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις η εκκένωση προσκολλούσε στον αισθητήρα και στα σημεία στήριξης. Ένα σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι όλα τα μεταλλικά μέρη που συνδέονται με το μηχανισμό φρένου άκρης θα έπρεπε να είναι στιβαρά συνδεδεμένα με το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας. Τα στοιχεία στήριξης πλήττονταν κάτι που σημαίνει σχηματισμό τόξου μέσα στο πτερύγιο μεταξύ του στοιχείου στήριξης και του γειωμένου άξονα του φρένου. Συνδέοντας τα στοιχεία στήριξης με το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας θα αποτρεπόταν η φθορά από το τόξο στον άξονα του φρένου και θα αποφεύγονταν οι φθορές λόγω υπερτάσεων

Δοκιμές σε πτερύγια με αγώγιμο επικαλυπτικό στρώμα [18]

Εδώ τίθενται υπό δοκιμή κάτω από υψηλές τάσεις πτερύγια ή τμήματα πτερυγίων που διαθέτουν ένα αγώγιμο επικαλυπτικό στρώμα σε ένα τμήμα της επιφάνειάς τους. Πιο συγκεκριμένα έχουν διεξαχθεί δοκιμές σε αγώγιμα στρώματα πτερυγίων βελτιωμένα με ένα ειδικό μείγμα αντιμονίου. Η βελτίωση έγινε για 10% και 30% του μείγματος του αντιμονίου. Τα αγώγιμα αυτά στρώματα τοποθετήθηκαν σε ένα μέρος της επιφάνειας ενός επιμήκους τμήματος πτερυγίου από γυαλί ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (GRP). Έπειτα από δοκιμές με υψηλές τάσεις παρατηρήθηκε για το αγώγιμο στρώμα με 10% ότι η εκκένωση δεν κινείται κατά μήκος του στρώματος αλλά από την επιφάνεια του πτερυγίου που δεν καλύπτεται, από το υλικό δηλαδή του πτερυγίου. Σε αντίθεση είναι η εκκένωση για το αγώγιμο στρώμα με 30%

πραγματοποιήθηκε κατά μήκος του αγωγίμου επικαλυπτικού στρώματος. Στην περίπτωση μάλιστα αυτή η ηλεκτρική διάσπαση λάμβανε χώρα για μεγαλύτερα επίπεδα τάσης. Δοκιμές με υψηλά ρεύματα έδειξαν ότι για αυξανόμενο πάχος του αγωγίμου στρώματος αυξάνεται και ο αριθμός των διασπάσεων που υφίσταται. Το ίδιο συμβαίνει καθώς αυξάνεται η επιφάνεια του αγωγίμου στρώματος. Στις παρακάτω τρεις φωτογραφίες βλέπουμε τα αποτελέσματα δοκιμών σε πτερύγια με επικαλυπτικό στρώμα.



Εικόνα 5.24: Διάσπαση στο επικαλυπτικό στρώμα με 10% αντιμόνιο [18]



Εικόνα 5.25: Εκκενώσεις στο στρώμα με 30% αντιμόνιο [18]



Εικόνα 5.26: Διάσπαση σε στρώμα με 30% αντιμόνιο [18]

5.2.1.11 Πείραμα πτερυγίου τύπου JSW J40-a

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων που έχουν διεξαχθεί για διάφορους τύπους δεκτών κεραυνών οι οποίοι χρησιμοποιούνται εν γένει στις ανεμογεννήτριες.

Πειραματικά μοντέλα πτερυγίων

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε ένα πτερύγιο μήκους 2m τμήμα ενός μεγαλύτερου μήκους 40m και τύπου JSW J40-a το οποίο ανήκει στο ανεμογεννήτρια τύπου JSW J82-2.0 με ονομαστική ισχύ εξόδου 2 MW και αποτελούμενο από ινοπλισμένα πολυμερή γυαλιού. Ο Πίνακας 5.9 συνοψίζει τις γενικές προδιαγραφές του μοντέλου.

Μήκος πτερυγίου	40.0m
Max. chord length	3.0m
Μέγ. Ισχύς	2000KW
Component Fiber	E-glass
Component Plastic	Epoxy
Βάρος	6450kg
IEC class	I _A for extremes II _A for gatigue

Πίνακας 5.9: Γενικές προδιαγραφές Α/Γ τύπου JSW J82-2.0

Τα πειράματα εκτελέστηκαν σε τρία διαφορετικά πτερυγία με τρεις διαφορετικούς τύπους δεκτών κεραυνού, αντίστοιχα, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.27 και στον Πίνακα 5.10.

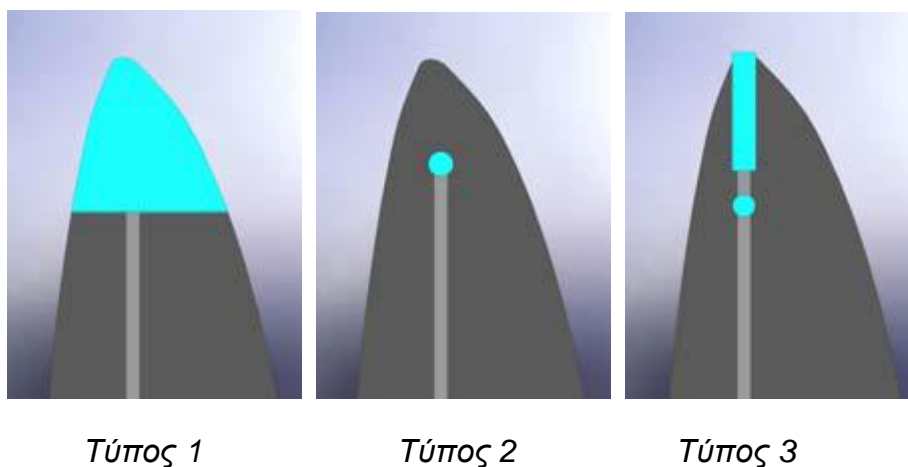
Ο τύπος 1 είχε ένα συμπαγή μεταλλικό δέκτη του οποίου το σχήμα ήταν πανομοιότυπο με το άκρο του πτερυγίου.

Ο τύπος 2 είχε μεταλλικό δέκτη στρογγυλού σχήματος τοποθετημένο στην πλευρά απορρόφησης του πτερυγίου.

Ο τύπος 3 είχε τρεις δέκτες, έναν μεταλλικό δέκτη ραβδωτού σχήματος τοποθετημένο στο άκρο του πτερυγίου και άλλους δύο μικρούς μεταλλικούς δέκτες στις δύο επιφάνειες του πτερυγίου. Αυτοί οι τρεις τύποι δεκτών κεραυνού καλύπτουν τα περισσότερα είδη δεκτών με ευρεία χρήση.

Πειραματική μέθοδος και εξοπλισμός

Τα πειράματα εκτελέστηκαν προσομοιώνοντας την κεραυνική εκκένωση με μία γεννήτρια παλμικής τάσης. Η απόσταση μεταξύ του ηλεκτροδίου και του άκρου του πτερυγίου τέθηκε στο 1μ και σε 6 διαφορετικές, διαδοχικές γωνίες θ μεταξύ τους, τόσο με την επίπεδη πλευρά του πτερυγίου (flap-wise) όσο και με την πλευρά της κόψης του πτερυγίου (edge-wise). Επιπρόσθετα, οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν τόσο με θετική όσο και με αρνητική πολικότητα ηλεκτρικής εκκένωσης και όλοι οι δέκτες γειώνονταν μέσω της καθόδου. Όλες οι συνθήκες κάτω από τις οποίες έγιναν οι δοκιμές συνοψίζονται στον Πίνακα 5.10.



Εικόνα 5.27: Δέκτες κεραυνού πτερυγίου

Electrode Position		Scanning direction	Polarity
Distance	Angle	Flap-wise or Edge-wise	Positive or Negative
1m	0deg		
	30deg		
	60deg		
	90deg		
	90deg -200mm		
	90deg -500mm		

Πίνακας 5.10: Συνθήκες δοκιμής

Συμπεράσματα δοκιμής

Το παραπάνω πείραμα που πραγματοποιήθηκε έδειξε ότι κάθε δέκτης έχει διαφορετική λειτουργία και συμπεριφορά. Ένα πτερύγιο με συμπαγή μεταλλικό δέκτη (Τύπος 1) και ένα πτερύγιο με μεταλλικό δέκτη ραβδωτού σχήματος (Τύπος 2), έχουν καλύτερη απόδοση σε σχέση με το πτερύγιο με τον μεταλλικό δέκτη στρογγυλού σχήματος.

Επίσης τα πειράματα έδειξαν ότι η απόδοση των δεκτών μπορεί να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας κεραμικό υλικό ή ακίδα τα οποία προορίζεται να μετατοπίσει ή να δημιουργήσει μια συγκέντρωση ηλεκτρικού πεδίου ώστε να ελέγχει ένα κεραμικό σημείο.

5.3 Αντικεραυνική προστασία των εδράνων κύλισης και του κιβωτίου ταχυτήτων [10]

Όπως έχει αναφερθεί η διαδρομή του κεραμικού ρεύματος είναι από τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας προς τον πύργο μέσω του εδράνου του βήματος πτερυγίου, του κυρίως εδράνου και του εδράνου του συστήματος προσανατολισμού. Αυτές είναι επομένως εν δυνάμει ευάλωτες περιοχές σε φθορά λόγω του κεραμικού

πλήγματος. Ολοκληρωμένη λύση για το πρόβλημα της προστασίας των εδράνων δεν υπάρχει καθώς υπάρχουν αρκετά προβλήματα στην πράξη. Γενικότερα όμως θα μπορούσαμε να πούμε ότι:

- Συγκολλημένοι ιμάντες (λωρίδες) και δακτύλιοι ολίσθησης (slip rings) ή ψήκτρες (brushes) παράλληλα με το έδρανο αναμένεται να είναι εν μέρει αποτελεσματικοί. Ένα μέρος του ρεύματος θα περνούσε μέσω αυτών αλλά το υπόλοιπο θα περνούσε μέσω του εδράνου.
- Το έδρανο θα μπορούσε να αποτελεί μέρος της διαδρομής του ρεύματος μιας και μπορεί αποτελεσματικά να μεταφέρει το ρεύμα εκτός του κυρίως άξονα στον πύργο δια μέσου μιας διαδρομής με χαμηλή αυτεπαγωγή. Με τον τρόπο αυτόν μπορεί να προστατευθεί η γεννήτρια και τα συστήματα ελέγχου της από τις επιδράσεις του κεραυνικού ρεύματος.

Όπως έχει ήδη ειπωθεί τα μεγάλα υπερφορτωμένα και στάσιμα έδρανα δεν υφίστανται σημαντική φθορά από τη διέλευση του κεραυνικού ρεύματος. Για το λόγο αυτό τα αργά κινούμενα έδρανα όπως τα έδρανα βήματος και κλίση ίσως να μην έχουν ανάγκη αντικεραυνικής προστασίας. Παρ' όλα αυτά όμως προτείνεται η δημιουργία εναλλακτικών διαδρομών του ρεύματος από κάποιον εύκαμπτο αγωγό από τους ολισθαίνοντες οδηγούς ή από κάποια παρόμοια κατασκευή. Τα στρεφόμενα έδρανα (κυρίως αξονικό έδρανο, έδρανα του κιβωτίου ταχυτήτων και της γεννήτριας) σε αντίθεση με τα στάσιμα υφίστανται φθορές και θα πρέπει να δοθεί αυξημένο ενδιαφέρον για την προστασία τους. Για να αποφευχθεί η φθορά και οι δυσμενείς συνέπειες του κεραυνικού ρεύματος ένας ασφαλής τρόπος είναι να αποτρέπεται το ρεύμα του κεραυνού από το να κυκλοφορεί δια μέσου των εδράνων κύλισης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί δημιουργώντας εναλλακτικές διαδρομές καθώς και διακοπές στην πορεία του ρεύματος με μονωτικά στρώματα στα έδρανα. Ενώ για την αντικεραυνική προστασία αυτό είναι μια καλή μέθοδος στην πράξη δεν είναι και τόσο πρακτικό λόγω των απαιτήσεων των φορτίων των εδράνων κύλισης. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι είναι δύσκολο να συνδυαστεί η ανάγκη της λίπανσης για την μείωση των τριβών και ταυτόχρονα η καλή μεταλλική επαφή που απαιτείται ώστε να άγεται το παραγόμενο ρεύμα. Η δημιουργία εναλλακτικών διαδρομών συντελεί στο να μειωθεί το ρεύμα που διέρχεται από τα έδρανα, όμως αυτό παρουσιάζει κάποιες δυσκολίες στο να εφαρμοστεί. Τα έδρανα από την κατασκευαστική τους φύση παρουσιάζουν μικρή αυτεπαγωγή και μικρή αντίσταση επομένως είναι δύσκολο να υπάρξει εναλλακτική διαδρομή για το ρεύμα που να

παρουσιάζει μικρότερη αυτεπαγωγή και αντίσταση. Μια επιπρόσθετη δυσκολία είναι ότι οι πρόσθετες εγκατεστημένες συνδέσεις θα πρέπει να διασχίζουν στρεφόμενα μέρη. Αυτό επιβάλλει την χρήση δακτυλίων ολίσθησης ή παρόμοιων συσκευών. Με προσεκτική σχεδίαση και τοποθέτηση του δακτυλίου ολίσθησης καθώς και με μικρής τιμής αυτεπαγωγή των συνδέσεων με την νασέλλα και την επίπεδη πλάκα μπορεί να εξασφαλιστεί καλή προστασία.



Εικόνα 5.28: Δακτύλιος ολίσθησης μιας Α/Γ [10]

Ο δακτύλιος ολίσθησης είναι μια συσκευή που επιτρέπει την μεταφορά ισχύος από ένα στατικό, ακίνητο μέρος σε ένα στρεφόμενο και το αντίθετο. [10]

5.3.1 Αγωγοί καθόδου [12],[16],[19]

Οι αγωγοί καθόδου χρησιμοποιούνται για να οδηγήσουν το ρεύμα του κεραυνικού πλήγματος με ασφάλεια στο σύστημα γείωσης της ανεμογεννήτριας. Συγκεκριμένα πρέπει η διαδρομή που θα ακολουθήσει το ρεύμα να είναι αυτή με την μικρότερη αυτεπαγωγή. Για το λόγο αυτό πρέπει να είναι κατά το δυνατόν σύντομη, συνεχής, ευθεία και κατακόρυφη (έτσι περιορίζεται η αυτεπαγωγή κατά μήκος). Επίσης πρέπει να εξασφαλίζεται ότι δεν θα περνάει κοντά από ευαίσθητες συσκευές (ηλεκτρονικά συστήματα της ανεμογεννήτριας). Για τις περισσότερες ανεμογεννήτριες ο ίδιος

χαλύβδινος πύργος της κατασκευής αποτελεί την διαδρομή με την χαμηλότερη αυτεπαγωγή και έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν αγωγός καθόδου. Με το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος να ρέει κατά μήκος των εξωτερικών τοιχωμάτων του πύργου, τα μαγνητικά πεδία στο εσωτερικό της κατασκευής είναι αρκετά εξασθενημένα. Όταν ο πύργος της ανεμογεννήτριας δεν είναι αγωγίμος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν αγωγός καθόδου. Στην περίπτωση αυτή κατά την επιλογή του αριθμού και του τρόπου εγκατάστασης των αγωγών καθόδου πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι αν το ρεύμα του κεραυνού επιμερίζεται σε πολλές οδούς όδευσης, μειώνεται η πιθανότητα εμφάνισης δευτερογενών υπερπηδήσεων και περιορίζονται οι ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις στο εσωτερικό της κατασκευής. Επομένως οι αγωγοί καθόδου πρέπει να κατανέμονται κατά το δυνατόν περιμετρικά της κατασκευής σε συμμετρική διάταξη. Στις περισσότερες περιπτώσεις επιλέγονται τουλάχιστον 3 αγωγοί καθόδου οι οποίοι πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους με οριζόντιους περιμετρικούς δακτυλίους κοντά στη στάθμη του εδάφους, ενώ ανάλογα με το ύψος της ανεμογεννήτριας και την επιλεγμένη στάθμη προστασίας χρησιμοποιούνται επιπλέον δακτύλιοι σε κατακόρυφα διαστήματα όπως ορίζονται στο πίνακα 3.15.

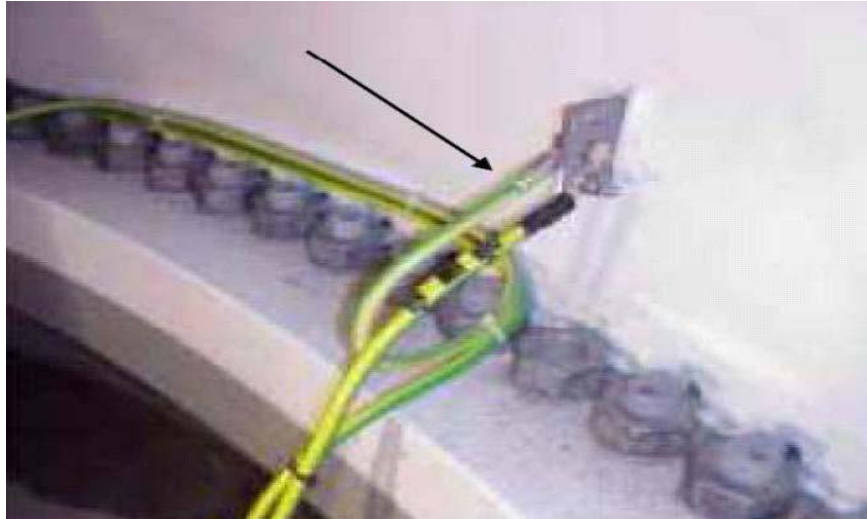
Στάθμη Προστασίας	Μέση αποσταση (m)
I	10
II	10
III	15
IV	20

Πίνακας 5.11: Μέση απόσταση των δακτυλίων σε κατακόρυφα διαστήματα

Οι αγωγοί καθόδου πρέπει να στερεώνονται καλά ώστε οι μηχανικές επιδράσεις του ρεύματος του κεραυνού ή άλλες καταπονήσεις να μην προκαλούν θραύση ή χαλάρωση των αγωγών. Ο αριθμός των συνδέσεων κατά μήκος των αγωγών πρέπει να είναι ο ελάχιστος δυνατός. Η στιβαρότητα των συνδέσεων πρέπει να εξασφαλίζεται με μεθόδους όπως μπρουτζοκόλληση, ηλεκτροσυγκόλληση, σύσφιξη, βίδωμα ή με ειδικούς κοχλιωτούς συνδέσμους. Παρακάτω ακολουθούν

παραστατικά οι συνδέσεις των αγωγών καθόδου με την νασέλλα, τον πύργο και τα θεμέλια του πύργου όπου βρίσκεται και το σύστημα γείωσης.

Τα καλώδια όλων των συνδέσεων θα πρέπει να είναι επαρκούς διατομής (πχ 50mm^2 για Cu) και η μόνωσή τους θα πρέπει να είναι κατά προτίμηση από δικτυωμένο πολυαιθυλένιο (XLPE) ώστε να είναι πιο ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες που προκαλούνται από την διέλευση του ρεύματος του κεραυνού. Στις περιπτώσεις όπου θέλουμε να προστατεύσουμε τον αγωγό καθόδου από μηχανικές καταπονήσεις αντί του λυόμενου συνδέσμου τοποθετούμε προστατευτικό αγωγό διαμέτρου $\Phi 16\text{mm}$ χαλύβδινο θερμά επιψευδαργυρωμένο ή χάλκινο. Η χρησιμοποίηση ως μηχανική προστασία σωλήνας πλαστικής ή μεταλλικής δεν ενδείκνυται, διότι δεν επιτρέπει τον οπτικό έλεγχο του αγωγού της καθόδου. Κατά την είσοδο των αγωγών στο έδαφος θα πρέπει να επενδύονται με αντιδιαβρωτική ταινία $20\text{-}30\text{ cm}$, πριν και μετά την είσοδο τους στο έδαφος, προς αποφυγή της διάβρωσης των αγωγών σε εκείνο το σημείο. Ο μεταλλικός σκελετός της νασέλλας συνδέεται στα θεμέλια του πύργου με καλώδια (πχ Cu 50mm^2). Η νασέλλα, τα δαχτυλίδια του εδράνου του συστήματος προσανατολισμού και ο πύργος της ανεμογεννήτριας συνδέονται μεταξύ τους και η σύνδεση αυτή καταλήγει στα θεμέλια του πύργου όπου υπάρχει το σύστημα γείωσης. Επιπρόσθετα οι ολισθαίνουσες επαφές του εδράνου κύλισης του συστήματος προσανατολισμού είναι εφοδιασμένα με χάλκινες συνδέσεις διαμέτρου 30 mm . Αυτό γίνεται με σκοπό να περάσει το ρεύμα του κεραυνού από την βάση της νασέλλας στις ολισθαίνουσες επαφές του συστήματος προσανατολισμού και στον πύργο χωρίς να επηρεαστεί ο εξοπλισμός του συστήματος προσανατολισμού. Ο αγωγός καθόδου στη βάση του πύργου συνδέεται με τον πύργο και με το σύστημα γείωσης που βρίσκεται στα θεμέλια του πύργου.



Εικόνα 5.29: Σύνδεση του αγωγού καθόδου με τον πύργο και μέσω των θεμελίων με το σύστημα γείωσης [19]

Αν ο πύργος της ανεμογεννήτριας είναι κατασκευασμένος από χάλυβα τα κεραυνικά ρεύματα διαμοιράζονται από την νασέλλα στο ηλεκτρόδιο γείωσης μέσω του ίδιου του αγωγίμου πύργου αν δεν χρησιμοποιούμε ξεχωριστούς αγωγούς καθόδους. Υπάρχουν βέβαια βραχίονες συγκολλημένοι με τον πύργο που τον συνδέουν με το ηλεκτρόδιο γείωσης. Αν ο πύργος είναι κατασκευασμένος από τσιμέντο για να διασφαλιστεί η αγωγή του ρεύματος προς τη γη χρησιμοποιούνται χαλύβδινες λωρίδες που συνδέουν τον πύργο με τα θεμέλια και κατά συνέπεια νε το σύστημα γείωσης.

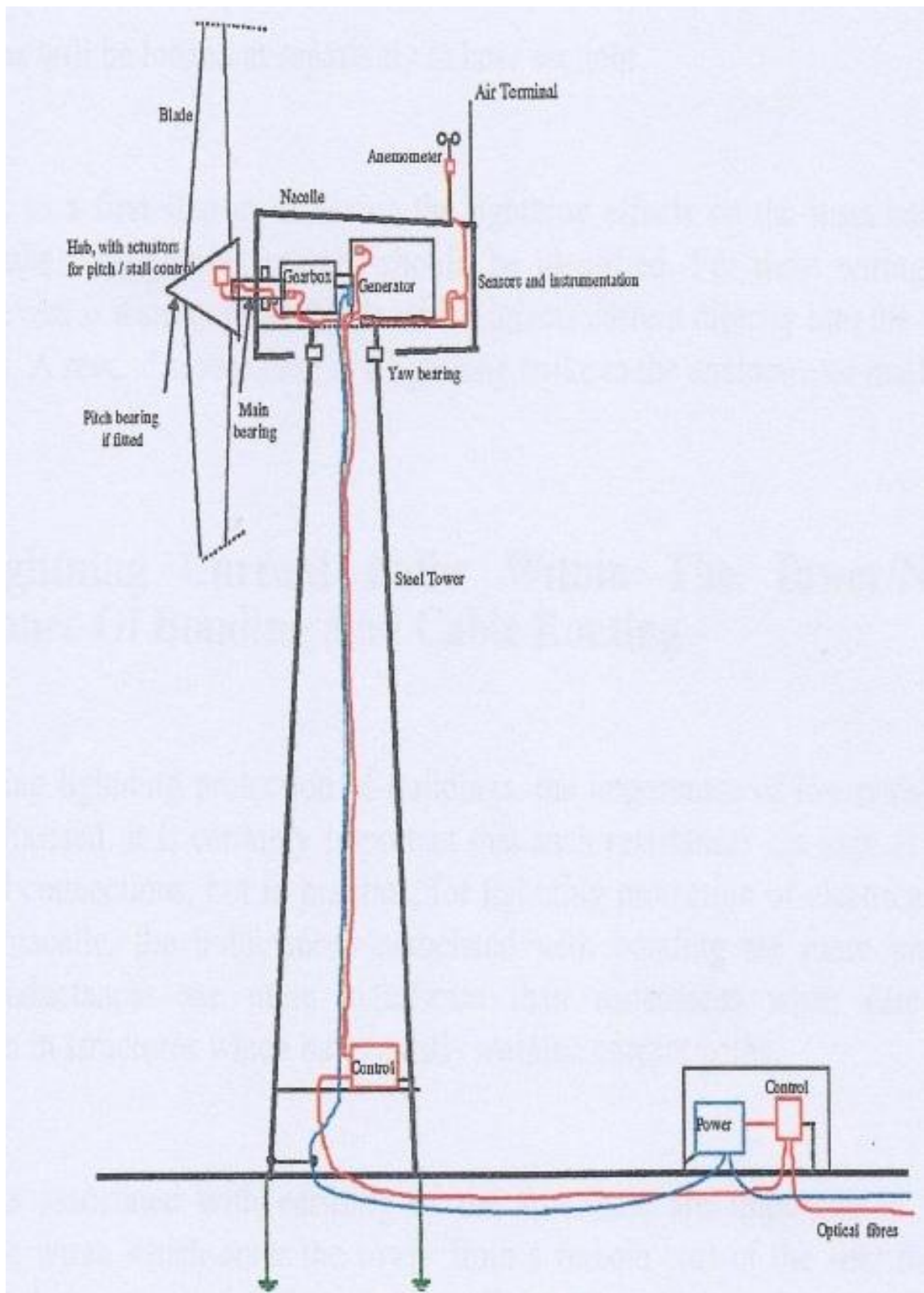


Εικόνα 5.30: Σύνδεση μεταξύ του τσιμεντένιου πύργου και του θεμελιακού ηλεκτροδίου γείωσης [16]

5.4 Διαδρομές του ρεύματος στα μέρη μιας ανεμογεννήτριας [10]

Όταν ένα κεραυνικό πλήγμα πλήξει μια ανεμογεννήτρια τα μέρη που θα πληγούν περισσότερο είναι τα ευαίσθητα μέρη της (ηλεκτρονικά μέρη). Σε μια ανεμογεννήτρια υπάρχουν πολλών ειδών αισθητήρες οι οποίοι μεταδίδουν πληροφορίες στον εξοπλισμό ελέγχου της. Τέτοιες συσκευές μπορεί να είναι ελεγκτές κατεύθυνσης ανέμου, αισθητήρες ταχύτητας του άξονα και μετρητές θερμοκρασιών. Υπάρχουν επίσης αισθητήρες σχετικοί με το μηχανισμό του βήματος πτερυγίου ή του μηχανισμού φρένου άκρης. Κατά το πλήγμα από κεραυνό στο πύργο ή στο πτερύγιο επάγονται τάσεις και ρεύματα στην καλωδίωση που συνδέει τα παραπάνω όργανα. Οι αισθητήρες και τα κυκλώματα ελέγχου είναι πιο ευάλωτοι σε σχέση με τα κυκλώματα ισχύος λόγω του ότι έχουν σχετικά χαμηλές τάσεις λειτουργίας.

Αντίστοιχη εικόνα με τις διαδρομές του κεραυνικού ρεύματος σε μια ανεμογεννήτρια απεικονίζεται στην εικόνα 5.31.



Εικόνα 5.31: Αισθητήρες, εξοπλισμός ελέγχου, εξοπλισμός ισχύος και όδευση καλωδίων σε μια τυπική ανεμογεννήτρια [10]

5.4.1 Οι διαδρομές του κεραυνικού ρεύματος στο εσωτερικό της νασέλλας και του πύργου [10]

Σε μελέτες αντικεραυνικής προστασίας οποιασδήποτε κατασκευής δίδεται έμφαση οι συνδέσεις να είναι χαμηλής αντίστασης. Πολύ σημαντική παράμετρος για την προστασία των ηλεκτρικών συστημάτων στο εσωτερικό μιας ανεμογεννήτριας επίσης είναι οι αυτεπαγωγές που σχετίζονται με τις συνδέσεις. Κατά την πτώση του κεραυνού στη νασέλλα ή στο πτερύγιο το ρεύμα ρέει μέσω της κατασκευής προς το έδαφος. Από την πλήμνη μέχρι το έδαφος υπάρχει επαρκής μεταλλική κατασκευή για να μεταφέρει το ρεύμα χωρίς να δημιουργούνται δομικές καταστροφές. Το ρεύμα θα διαμοιραστεί μεταξύ οποιονδήποτε αγωγίμων διαδρομών και αυτό που παίζει τον πιο σημαντικό ρόλο για το πώς θα διαμοιραστεί το ρεύμα είναι οι αυτεπαγωγές των διαδρομών αυτών. Τα καλώδια και οποιαδήποτε αγωγίμα σύρματα αποτελούν πιθανές διαδρομές του ρεύματος. Ένας καλός σχεδιασμός θα εξασφάλιζε την ύπαρξη διαδρομών του ρεύματος έτσι ώστε το ρεύμα που μεταφέρεται από τα καλώδια να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο. Οι διαδρομές του ρεύματος που εγκαθίστανται θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερης αυτεπαγωγής για να είναι πιο αποτελεσματικές. Όταν έχουμε πολλά κεραυνικά πλήγματα, το κεραυνικό ρεύμα που ρέει κατά μήκος μιας συνδετικής λωρίδας μήκους 10cm θα δημιουργήσει τάση περίπου 10kV. Τάση τέτοιας τιμής θα μπορεί να προκαλέσει ηλεκτρική διάσπαση σε οποιονδήποτε αισθητήρα ή εξοπλισμό και έγχυση υψηλών ρευμάτων στα καλώδια. Η τάση μπορεί να μειωθεί τουλάχιστον κατά 10 φορές αν τα καλώδια οδεύουν μέσα σε μεταλλικό κανάλι σχήματος U ή σε αυλάκι. Θα μπορούσε απλά να λεχθεί ότι μικρές αλλαγές στη γεωμετρία των εγκαταστάσεων μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες διαφορές στις επαγόμενες τάσεις. Το να υπάρχει ένας αγωγός ικανός να μεταφέρει το ρεύμα δεν είναι το μοναδικό ζήτημα όταν είναι πιθανές βλάβες στο ηλεκτρονικό σύστημα. Τα καλώδια ενδέχεται να μην υποστούν καμία καταστροφή, αλλά είναι πιθανά αποτελέσουν αιτία για να εγχυθούν καταστροφικά ρεύματα στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό.

5.4.2 Η διαδρομή του κεραυνικού ρεύματος από την πλήμνη περιστροφής στη νασέλλα [10]

Η πλήμνη περιστροφής περιλαμβάνει αισθητήρες και μηχανισμούς για την κίνηση των πτερυγίων. Τα καλώδια των αισθητήρων στην περιστρεφόμενη πλήμνη πρέπει να διασχίζουν την νασέλλα μέσω δακτυλίων ολίσθησης και αυτό θα μπορούσε να είναι μια εκτεθειμένη περιοχή όπου η όδευση των καλωδίων είναι σημαντική. Η όδευση των καλωδίων σε τέτοια εκτεθειμένη περιοχή προκαλεί σημαντική διαφορά στα μεταβατικά φαινόμενα που παρατηρούνται. Σχηματικά η περιοχή της πλήμνης και του κυρίως εδράνου που είναι κατασκευασμένη από χάλυβα, οι καλωδιώσεις που βρίσκονται στην πλήμνη είναι τοπικά θωρακισμένες. Η πρακτική της όδευσης των καλωδίων από την πλήμνη περιστροφής στον χαλύβδινο άξονα ή στο εσωτερικό ενός σταθερού μεταλλικού σωλήνα είναι καλή μιας και ο σωλήνας θωρακίζει αποτελεσματικά τα καλώδια από μαγνητικά πεδία. Σε μια ιδανική περίπτωση οι δακτύλιοι ολίσθησης θα πρέπει να βρίσκονται στην πλευρά του κιβωτίου ταχυτήτων στο κυρίως έδρανο όπου τα ρεύματα που ρέουν είναι σχετικά μικρά. Αυτό συμβαίνει γιατί το μεγαλύτερο μέρος του κεραυνικού ρεύματος θα περάσει στη μεταλλική επιφάνεια μέσω του κυρίως εδράνου. Ο δακτύλιος ολίσθησης εκτός του κυρίως εδράνου θα ήταν εκτεθειμένος, κάτι που θα πρέπει να αποφεύγεται. Τα χαλύβδινα καλώδια που διασχίζουν το πτερύγιο μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν αγωγοί του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας αν έχουν επαρκή διατομή (50mm^2) αλλά θα πρέπει να συντηρείται στο τέλος της πλήμνης. Στο σημείο αυτό το ρεύμα θα πρέπει να άγεται ασφαλώς στο εσωτερικό χωρίς να διαρρέει κατά μήκος τα καλώδια των αισθητήρων ή τον υδραυλικό μηχανισμό όπου μπορούν να προκληθούν μεγάλες φθορές. Μια πιθανή μέθοδος θα ήταν να τοποθετηθεί ένα μονωτικό διάκενο στο χαλύβδινο καλώδιο και να συμπεριληφθεί ένας παράλληλος δρόμος προς την πλήμνη μέσω σπινθηριστών. Τα διάκενα θα μπορούσαν απλά να είναι μια οπή στην διαδρομή του καλωδίου. Κάποιες φθορές αναμένονται και στις δύο πλευρές του διακένου, και έτσι για να προστατευτεί το χαλύβδινο καλώδιο από τέτοιες φθορές χρησιμοποιούνται πολλές φορές λεπτοί μεταλλικοί σωλήνες στην εξωτερική πλευρά του καλωδίου.

5.4.3 Η διαδρομή του κεραυνικού ρεύματος στην νασέλλα [10]

Υπάρχουν δύο είδη διαδρομών κεραυνικού ρεύματος για την νασέλλα:

1. Η διαδρομή του κεραυνικού ρεύματος σε μια τυπική νασέλλα

Στη πράξη είναι πολύ δύσκολο να έχουμε μεταλλική νασέλλα με τόσο συνεχείς συνδέσμους σε όλες τις αρθρώσεις της. Αν η νασέλλα είναι μεταλλική είναι πιθανόν να έχει:

- Λίγα σημεία ηλεκτρικής σύνδεσης
- Καμία άμεση ηλεκτρική συνέχεια μεταξύ του κυρίως εδράνου και της νασέλλας

Η έλλειψη συνδέσμων προκύπτει λόγω της αναγκαιότητας να υπάρχουν μονωτικά στρώματα, εμπόδια από καουτσούκ κτλ. Στην περίπτωση κεραυνικού πλήγματος στο πτερύγιο, το ρεύμα ρέει εν μέρει κατά μήκος της επίπεδης πλάκας της νασέλλας, μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων και της γεννήτριας. Η μεταλλική νασέλλα δεν παρέχει τόσο αποτελεσματική θωράκιση όσο αναμένεται. Μπορεί βέβαια να αυξηθεί με το να έχουμε εύκαμπτες συνδέσεις και ελαστικούς συνδέσμους σε επαφή με το κύριο έδρανο. Με τα προηγούμενα προσεγγίζουμε την ιδανική περίπτωση. Σε αντίθετη περίπτωση ένα πολύ σημαντικό ποσοστό του ρεύματος θα ρέει προς το κιβώτιο ταχυτήτων και την γεννήτρια. Αν η νασέλλα είναι κατασκευασμένη από ίνες γυαλιού αντί για μέταλλο τότε δεν παρέχεται καμία θωράκιση, και πάλι μεγάλο ποσοστό του ρεύματος θα ρέει προς το κιβώτιο ταχυτήτων και την γεννήτρια. Είναι λογικό να ειπωθεί ότι στις περιπτώσεις αυτές περίπου το 50% του κεραυνικού ρεύματος θα ρέει προς το κιβώτιο ταχυτήτων από το κυρίως έδρανο. Παρ' όλα αυτά όμως αν οι άξονες μετάδοσης της κίνησης περιλαμβάνουν υλικό από καουτσούκ που παρέχει ηλεκτρική απομόνωση ώστε να αποτρέπεται η ροή ρεύματος στο κιβώτιο ταχυτήτων, τότε αυτό μπορεί να είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για να μειωθεί η ένταση των μεταβατικών φαινομένων στα μέρη που είναι τοποθετημένα στην γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων.

2. Η διαδρομή του κεραυνικού ρεύματος σε μια νασέλλα με ιδανικές συνδέσεις

Στην περίπτωση που θα είχαμε ιδανική σύνδεση η νασέλλα θα ήταν κατασκευασμένη από μεταλλικά φύλλα και θα υπήρχαν συνεχείς συνδέσεις και ηλεκτρικές συνδέσεις γύρω από όλα τα φύλλα. Στην πράξη αυτό σημαίνει ότι στην νασέλλα θα υπήρχαν αρκετοί εύκαμπτοι σύνδεσμοι ή αρκετές συνδετικές λωρίδες και

θα υπήρχε έτσι συνεχής μεταλλική σύνδεση. Θα υπάρχει επίσης καλή σύνδεση ανάμεσα στο κυρίως έδρανο και στην νασέλλα όχι μόνο στη επίπεδη βάση της αλλά και στο άνω μέρος της. Εάν το ρεύμα δεν μπορεί εύκολα να περάσει από το έδρανο στην νασέλλα (είτε διαμέσου μιας άμεσης σύνδεσης είτε από κοντινούς συνδέσμους της νασέλλας προς την επίπεδη πλάκα) τότε το ρεύμα θα ρέει κατά μήκος της επίπεδης πλάκας και θα δημιουργεί επαγόμενες τάσεις στις καλωδιώσεις στο εσωτερικό της νασέλλας. Εάν η επίπεδη πλάκα και η νασέλλα προσφέρουν μια κλειστή αγωγίμη κατασκευή τότε το ρεύμα θα περιοριστεί στην επιφάνειά της και ένα μικρό ποσοστό του θα ρέει στο εσωτερικό της νασέλλας. Για να επιτευχθεί αυτό, το έδρανο θα πρέπει να είναι πολύ καλά συνδεδεμένο με την επίπεδη πλάκα και την νασέλλα, ειδάλλως το ρεύμα δεν μπορεί εύκολα να άγεται από την νασέλλα και θα συνεχίσει να ρέει κατά μήκος του άξονα. Στην περίπτωση αυτή και κατά την διάρκεια κεραυνικού πλήγματος στο περύγιο το ρεύμα του κεραυνού άγεται κατά μήκος του άξονα προς το κυρίως έδρανο. Αν το κυρίως έδρανο είναι συνδεδεμένο και με την νασέλλα και με την επίπεδη πλάκα τότε σχεδόν όλο το ρεύμα θα άγεται εκτός των εδράνων πάνω στην εξωτερική επιφάνεια της νασέλλας και δια μέσου της επιφάνειας της επίπεδης πλάκας επάνω στην νασέλλα. Αυτό είναι μια καλή λύση μιας και το ρεύμα της νασέλλας και ο εσωτερικός εξοπλισμός παραμένει ανεπηρέαστος. Εάν υπάρχει διαδρομή του ρεύματος μεταξύ του κυρίως εδράνου και του κιβωτίου ταχυτήτων με υλικό από καουτσούκ τότε αυτό είναι πολύ καλύτερο καθώς αποτρέπει κάθε ρεύμα που ρέει προς την γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων. Το ρεύμα ρέει δια μέσου του εξωτερικού της νασέλλας ομοιόμορφα προς τα κάτω διασχίζοντας το έδρανο του συστήματος προσανατολισμού και τον πύργο. Στην ιδανική αυτή περίπτωση το έδρανο του συστήματος προσανατολισμού δεν απαιτείται να έχει μονωτικές επιφάνειες και επιτρέπει στο ρεύμα να ρέει ομοιόμορφα μέσω της περιφέρειάς του.

5.4.4 Η διαδρομή του κεραυνικού ρεύματος δια μέσου του εδράνου του συστήματος προσανατολισμού [10]

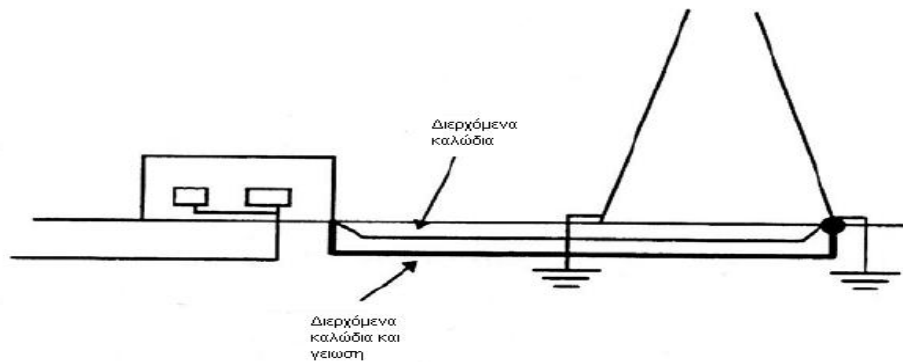
Εδώ το ρεύμα μπορεί να άγεται ελεύθερα από ολόκληρη την περιφέρειά τους. Το έδρανο δεν διακόπτει σημαντικά την θωράκιση που παρέχεται από τον ίδιο τον πύργο. Αν όμως το έδρανο περιλαμβάνει μονωτικό στρώμα πιθανόν υλικό όπως

PTFE αυτό θα παρουσιάζει ένα φράγμα στην ροή του ρεύματος. Τέτοιο έδρανο θα έχει τουλάχιστον ένα δακτύλιο ολίσθησης για να προβάλλει ηλεκτρική συνέχεια. Το κεραυνικό ρεύμα θα πρέπει να είναι συγκεντρωμένο στην περιοχή του δακτυλίου ολίσθησης. Καθώς το κεραυνικό ρεύμα δεν ρέει πλέον ομοιόμορφα στην εξωτερική επιφάνεια της νασέλλας ή του πύργου η περιοχή αυτή μπορεί να αποτελεί πηγή επαγόμενων τάσεων. Είναι πολύ καλύτερο να υπάρχουν περισσότερες από μια κινητές επαφές στον δακτύλιο ολίσθησης. Οι επαφές αυτές πρέπει να είναι διασκορπισμένες γύρω από την περιφέρεια του πύργου ώστε η ομοιομορφία της ροής του ρεύματος προς το κάτω μέρος του πύργου να εξασφαλίζεται.

5.4.5 Όδευση καλωδίων εξωτερικά του πύργου [10]

Το ρεύμα του κεραυνού ρέει κάτω από τον πύργο προς το έδαφος μέσω του συστήματος γείωσης και έπειτα διαχέεται στην επιφάνεια του εδάφους. Τα καλώδια που είναι εγκατεστημένα στο έδαφος είναι δυνατό να αποτελέσουν κατάλληλη διαδρομή για τα ρεύματα αυτά. Αν όπως είναι πιθανόν το έδαφος να είναι πετρώδες ή να έχει μεγάλη ωμική αντίσταση τότε τα μεγάλου μήκους καλώδια ισχύος ή τα καλώδια των ηλεκτρονικών συστημάτων παρέχουν μια σημαντική διαδρομή για το ρεύμα. Για μονωμένα καλώδια ισχύος οι τάσεις για μήκη πάνω από 1km είναι δυνατόν να προκαλέσουν διάσπαση της μόνωσής τους. Η χρήση εκτροπέων υπέρτασης είναι πολύ σημαντική. Ενώ τα καλώδια ισχύος έχουν από την φύση τους μια αντοχή στα μεταβατικά φαινόμενα του κεραυνού, τα καλώδια σημάτων και τα σχετιζόμενα με αυτά ηλεκτρονικά μέρη είναι ιδιαίτερα ευάλωτα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται οπτικές ίνες. Και αυτές οι οπτικές ίνες δεν θα πρέπει να έχουν καλώδια με μεταλλικά ίχνη καθώς μπορούν να μεταφέρουν ρεύμα και να τηχθούν. Η περίπτωση των καλωδίων που οδεύουν ανάμεσα στον πύργο και στον παρακείμενο μετασχηματιστή ισχύος δεν είναι τόσο σοβαρή, επειδή τα μήκη των οδεύσεων είναι σχετικά μικρά και είναι σχετικά εύκολο να υπάρξει προστασία. Για λόγους ασφάλειας η βάση του πύργου έχει ένα καλώδιο γείωσης που ενώνει το σύστημα ισχύος στον πύργο με την κυψέλη (ή τις κυψέλες) που περιέχει συστήματα διαχείρισης ισχύος και εκεί πρέπει να υπάρχει καλή σύνδεση με τη γη. Οι επαγόμενες τάσεις στα καλώδια σημάτων και του ηλεκτρονικού εξοπλισμού γενικότερα μπορούν να μειωθούν σε μέγεθος απλά με το να οδεύουν τα καλώδια στο εσωτερικό ενός μεταλλικού σωλήνα συνδεδεμένου και στον πύργο και στην

κατασκευή που περικλείει τον μετασχηματιστή. Συνηθίζεται η κατασκευή που περικλείει τον μετασχηματιστή να γειώνεται στην γείωση του πύργου, έτσι τα καλώδια μπορούν να οδεύουν μαζί ανάμεσα στις δύο αυτές κατασκευές, με τα ευαίσθητα καλώδια να είναι θωρακισμένα.



Εικόνα 5.32: Οδευση καλωδίων σημάτων μεταξύ του πύργου και της κατασκευής που περικλείει τον μετασχηματιστή [10]

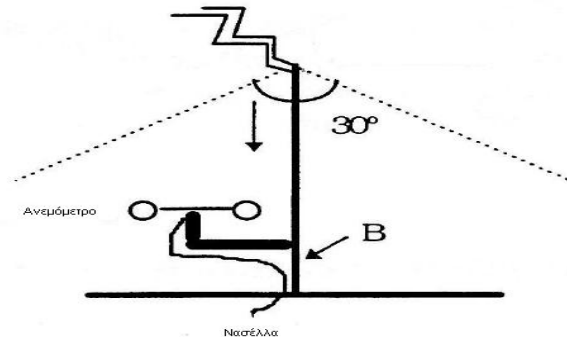
5.5 Ανεμόμετρο [10],[16],[19]



Εικόνα 5.33: Ανεμόμετρο [16]

Ένα από τα βασικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας είναι και το ανεμόμετρο. Το ανεμόμετρο είναι τοποθετημένο στην κορυφή της νασέλλας. Για λόγους αντικεραυνικής προστασίας το ανεμόμετρο είναι συχνά τοποθετημένο κάτω από έναν ιστό στον οποίο καταλήγει ο κεραυνός έτσι ώστε η πιθανότητα άμεσου πλήγματος

του ανεμομέτρου να ελαχιστοποιείται. Ο ιστός αυτός θα πρέπει να είναι 1m ψηλότερο από το ανεμόμετρο ώστε το ανεμόμετρο να βρίσκεται μέσα στον κώνο προστασίας των 30 όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 5.34.



Εικόνα 5.34: Ανεμόμετρο [10]

Παρόλο που αυτό προστατεύει το ανεμόμετρο από άμεσο πλήγμα, οι καλωδιώσεις που υπάρχουν στην νασέλλα (για τους αισθητήρες κτλ) βρίσκονται σε εκτεθειμένη θέση. Σε ότι αφορά τους αισθητήρες που βρίσκονται στην περιοχή της νασέλλας συχνά τροφοδοτούνται με ισχύ από μια συσκευή κοντά τους. Οι αισθητήρες όπως και τα ανεμόμετρα, οι διακόπτες κτλ συχνά είναι απομονωμένοι από το μεταλλικό κουτί κάτι που βοηθά στην αντικεραυνική προστασία. Για καλώδια που οδεύουν εξωτερικά του βραχίονα που στηρίζει το ανεμόμετρο όπως φαίνεται στη παραπάνω εικόνα το καλώδιο θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στον μεταλλικό βραχίονα στήριξης. Όταν το καλώδιο στην πορεία του προς τα κάτω βρίσκεται δίπλα στον ιστό που προστατεύει το ανεμόμετρο (σημείο Β στην προηγούμενη εικόνα), το οποίο είναι ικανό να μεταφέρει μεγάλες ποσότητες ρεύματος τότε απαιτούνται επιπλέον μέτρα προστασίας. Κάποιες ενέργειες που θα μπορούσαμε να κάνουμε σαν επιπλέον μέτρα προστασίας είναι:

1. Όδευση σε σωλήνα στερεωμένο σε σημεία κατά μήκος του με τον ιστό.
2. Όδευση σε εύκαμπτους, πεπλεγμένους μεταξύ τους αγωγούς και συνδεδεμένους με τον ιστό
3. Όδευση σε σωλήνα καλωδίων με σχήμα U ή C
4. Όδευση των καλωδίων πολύ κοντά στον ιστό

Αν η νασέλλα είναι μεταλλική τότε οι πεπλεγμένοι αγωγοί ή οι σωλήνες των

καλωδίων θα πρέπει να είναι συγκολλημένοι με την νασέλλα στο σημείο που τα καλώδια την διαπερνούν.

Για την περίπτωση της μεταλλικής νασέλλας, όταν η καλωδίωση οδεύει από τον ιστό μέσα στην νασέλλα το πρόβλημα είναι μικρό. Από την στιγμή που ο ιστός είναι καλά συγκολλημένος με την μεταλλική νασέλλα τότε απλά τα καλώδια συνεχίζουν την διαδρομή τους στην εσωτερική επιφάνεια της νασέλλας. Για την περίπτωση της νασέλλας από συνθετικό υλικό το κεραυνικό ρεύμα που διαρρέει τον ιστό θα πρέπει να άγεται ασφαλώς στο μεταλλικό δάπεδο της νασέλλας. Ενώ η αγωγή τέτοιων ρευμάτων μπορεί εύκολα να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας αγωγούς επαρκούς διατομής, τα καλώδια του ανεμομέτρου θα πρέπει να προστατεύονται, και ιδιαίτερη φροντίδα θα πρέπει να δίδεται στο να αποτραπούν επαγόμενες τάσεις στα καλώδια του ανεμομέτρου. Ένας εναλλακτικός τρόπος προστασίας του ανεμομέτρου είναι με ένα χαλύβδινο δακτυλίδι γύρω από αυτό. Το δακτυλίδι προστασίας είναι συνδεδεμένο με την εσωτερική κατασκευή της νασέλλας. Το θωρακισμένο καλώδιο οδηγείται στο εσωτερικό της κατασκευής από τον αισθητήρα στην νασέλλα.



Εικόνα 5.35: Το ανεμόμετρο μαζί με το προστατευτικό δακτυλίδι [19]

5.6 Προστασία έναντι υπερτάσεων (συστήματα SPDs = συσκευές προστασίας από υπερτάσεις ή εκτροπείς υπέρτασης) [20],[21]

Βέβαια για την ανεμογεννήτρια για αντικεραυνική προστασία πρέπει να προβλέψουμε και την παρουσία κυμάτων τάσης και ρεύματος. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται τα SPDs. Στις διάφορες ζώνες προστασίας που αναφέραμε παραπάνω χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι SPDs.

Στα όρια των ζωνών 0A-1 χρησιμοποιούνται SPDs που πρέπει να μπορούν να φέρουν πολλές φορές τμήματα του κεραυνικού ρεύματος κυματομορφής 10/350μs χωρίς να καταστρέφεται ο προστατευόμενος εξοπλισμός. Αυτά τα SPDs είναι τύπου 1 και ονομάζονται απαγωγείς ρεύματος κεραυνού. Σκοπός τους είναι να αποτρέψουν το επιβλαβές τμήμα του κεραυνικού ρεύματος από το να εισέλθει στην ηλεκτρική εγκατάσταση της κατασκευής. Στα όρια των ζωνών 0B-1 και πάνω ή των ζωνών 1-2 και πάνω χρειάζεται προστασία έναντι παλμών ρεύματος χαμηλής ενέργειας που προέρχονται συνήθως από τάσεις που επάγονται εξωτερικά ή από κύματα που παράγονται από το ίδιο σύστημα. Έτσι χρησιμοποιούνται SPDs τύπου 2 που ονομάζονται συσκευές προστασίας έναντι κυμάτων και πρέπει να αντέχουν παλμούς ρεύματος 8/20 μs. Στα όρια των ζωνών 2-3 και πάνω χρησιμοποιούνται SPDs τύπου 3 για την προστασία των τερματικών συσκευών έναντι κυμάτων που αναπτύσσονται μεταξύ της φάσης και του ουδέτερου. Στους παρακάτω 2 πίνακες (πίνακας 5.12 και πίνακας 5.13) αναφέρονται οι διάφοροι τύποι SPDs. Βέβαια είναι σημαντικό να γνωρίζουμε ότι το πρότυπο E DIN VDE 0675-6 /A1 and -6 / A2 ίσχυε μέχρι τον Οκτώβριο του 2004. Το πρότυπο αυτό αντικαταστάθηκε από το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 61643-11. [17],[18]

Τύπος/Περιγραφή	E DIN VDE 0675-6 με A1, A2	IEC 61643-1: 1998	EN 61643-11: 2001
Απαγωγέας κεραυνικού ρεύματος Συνδυασμός απαγωγέα κεραυνικού ρεύματος και υπέρτασης	Κλάση B	SPD κλάση I	SPD τύπου 1
Απαγωγέας υπέρτασης για πίνακες διανομής, υποπίνακες διανομής, σταθερές εγκαταστάσεις	Κλάση C	SPD κλάση II	SPD τύπου 2
Απαγωγέας υπέρτασης για πρίζες/τερματικές μονάδες	Κλάση D	SPD κλάση III	SPD τύπου 3

Πίνακας 5.12: Κατάταξη των SPDs σύμφωνα με τα πρότυπα VDE, IEC και EN

Κλάσεις SPDs	Χρήση
A	Σε εναέριες γραμμές χαμηλής τάσης
B	Σχεδιασμένα για κεραυνικές ισοδυναμικές συνδέσεις σύμφωνα με το DIN VDE 0185
C	Σχεδιασμένα για προστασία έναντι κυμάτων σε σταθερές εγκαταστάσεις, κατά προτίμηση για αντοχή παλμών τάσης κατηγορίας III (προστασία έναντι κυμάτων κατηγορίας III)
D	Σχεδιασμένα για προστασία έναντι κυμάτων σε κινητές/ σταθερές εγκαταστάσεις, κατά προτίμηση για αντοχή παλμών τάσης κατηγορίας II (προστασία έναντι κυμάτων κατηγορίας II)

Πίνακας 5.13: Τύποι SPDs για συστήματα παροχής ισχύος

5.6.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά των συστημάτων SPDs [20],[21]

Μια ιδανική διάταξη προστασίας έναντι υπερτάσεων πρέπει να συμπεριφέρεται ως ανοικτό κύκλωμα υπό κανονική λειτουργία της εγκατάστασης σε περίπτωση υπέρτασης να άγει χωρίς καθυστέρηση υπό τάση λίγο μεγαλύτερη της τάσης λειτουργίας της εγκατάστασης να μην επιτρέπει η τάση στην εγκατάσταση να αυξηθεί κατά τη διάρκεια που άγει, να περιορίζει το ρεύμα σφάλματος και να απορροφά την ενέργεια που το συνοδεύει να επιστρέφει στην κανονική κατάσταση λειτουργίας μετά την παρέλευση της υπέρτασης και να μην καταστρέφεται ποτέ. Παρακάτω αναφέρονται συνοπτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά των SPDs:

1.Μέγιστη τάση συνεχούς λειτουργίας V_c :

Η μέγιστη τάση συνεχούς λειτουργίας είναι η rms τιμή ης μέγιστης τάσης που μπορεί να εφαρμοστεί στα άκρα του εκτροπέα υπέρτασης κατά την διάρκεια της λειτουργίας. Είναι η μέγιστη τάση στην διάταξη κατά την διάρκεια που δεν άγει, που εξασφαλίζει ότι η διάταξη θα επιστρέψει στην κατάσταση αυτήν (της μη αγωγιμότητας) μετά την παρέλευση της υπέρτασης. Η τιμή της επιλέγεται ώστε να είναι ίση ή μεγαλύτερη από την μέγιστη επιτρεπόμενη τάση λειτουργίας της προστατευόμενης εγκατάστασης.

2.Κρουστικό ρεύμα I_{imp} :

Είναι η μέγιστη τιμή του ρεύματος κυματομορφής 10/35μs ή 8/20μs αντίστοιχα που μπορεί να διαρρεύσει τον εκτροπέα χωρίς να καταστραφεί.

3.Ονομαστικό ρεύμα I_n :

Είναι η μέγιστη τιμή του ρεύματος κυματομορφής 8/20μs. Χρησιμοποιείται για δοκιμές κατάταξης για SPDs τύπου 2 καθώς και για δοκιμές συντήρησης και βελτίωσης για SPDs τύπου 1 και 2.

4.Επίπεδο προστασίας V_p :

Είναι η τιμή κορυφής της τάσης που χαρακτηρίζει την ικανότητα του περιορισμού της υπέρτασης στα άκρα της διάταξης. Συνήθως από τους κατασκευαστές δίνεται ο λόγος V_p / V_c όπου το επίπεδο προστασίας αναφέρεται σε ονομαστικό ρεύμα. Επιλέγεται να είναι μικρότερο από την διαβαθμισμένη κρουστική τάση αντοχής του εξοπλισμού και να ικανοποιεί ένα περιθώριο ασφαλείας τουλάχιστον 20% σε σχέση με την μέγιστη πιθανή υπέρταση που μπορεί να εμφανιστεί στον εξοπλισμό.

5.Ικανότητα απαγωγής ακόλουθου ρεύματος υπό τάση V_c :

Πρόκειται για την rms τιμή του ακόλουθου ρεύματος δηλαδή του ρεύματος που διαρρέει την διάταξη μετά την διέλευση του κυρίου ρεύματος που μπορεί αυτόματα να εξαλειφθεί από την διάταξη όταν εφαρμοστεί η τάση V_c . Η ικανότητα αυτή θα πρέπει να αντιστοιχεί στο μέγιστο αναμενόμενο ρεύμα στην θέση εγκατάστασης του SPD, διαφορετικά πρέπει να χρησιμοποιηθεί μία ασφάλεια που θα αποτρέψει το ρεύμα αυτό να διαρρεύσει το SPD. Σύμφωνα με τα πρότυπα IEC 60364-5-534 και EN 61643-11 (VDE 0675 τμήματα 6-11), SPDs που συνδέονται μεταξύ ουδέτερων αγωγών και αγωγών προστασίας όπου μετά την απόκριση του SPD μπορεί να

εμφανιστεί ένα ακόλουθο ρεύμα και πρέπει να έχουν ικανότητα απαγωγής ακόλουθου ρεύματος $I_{fl} < 100A \text{ rms}$.

6. Προσωρινή υπέρταση Τον:

Σε περίπτωση σφάλματος στο δίκτυο μέσης τάσης μπορεί να εμφανιστούν προσωρινές υπερτάσεις βιομηχανικής συχνότητας στο δίκτυο χαμηλής τάσης, διάρκειας από μερικά μs μέχρι την παρέλευση του σφάλματος και εύρους μέχρι και 1200 V ($0.2\mu\text{s}$). Σε κάθε περίπτωση η διάταξη θα πρέπει να μπορεί να αντέχει την μέγιστη τιμή της προσωρινής υπέρτασης που μπορεί να εμφανιστεί στην εγκατάσταση.

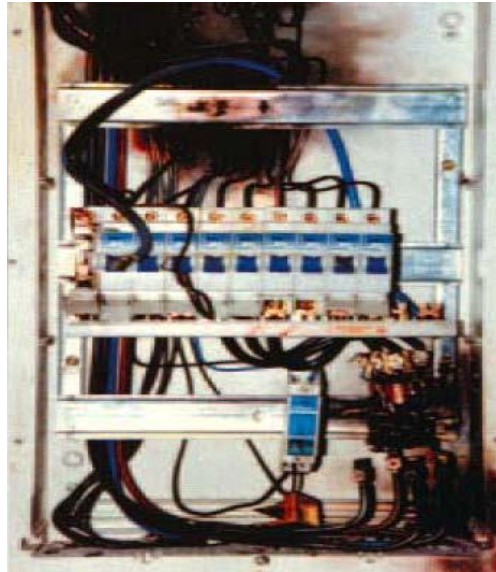
5.6.2 Συστήματα SPDs σε διάφορα δίκτυα [20]

Υπάρχουν διάφορα δίκτυα όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα συστήματα SPDs. Τέτοια δίκτυα είναι πχ δίκτυα TN, δίκτυα TT, δίκτυα IT. Ακολουθεί η περιγραφή της σύνδεσης των εκτροπέων υπέρτασης (SPDs) σε δίκτυα TN με ουδετερογείωση, περίπτωση που προσεγγίζει περισσότερο τη μορφή του δικτύου στο εσωτερικό της ανεμογεννήτρια. Για την προστασία έναντι έμμεσων πληγμάτων στα δίκτυα με ουδετερογείωση χρησιμοποιούνται διατάξεις προστασίας έναντι υπερρευμάτων και λοιπών ρευμάτων (RCD = Residual Current Device). ~



Εικόνα 5.36: Διπολικό RCD [20]

Αυτές οι διατάξεις πρέπει να τοποθετηθούν μετά τα SPDs (κυρίως τύπου 1 και 2). Σε διαφορετική περίπτωση μπορεί να υποστούν μηχανικές βλάβες λόγω των υψηλών δυναμικών που αναπτύσσονται από το κεραυνικό ρεύμα.



Εικόνα 5.37: Κατεστραμμένο RCD από ρεύμα κεραυνού [20]

Τα SPDs πρέπει πάντα να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με μία ασφάλεια σαν διάταξη προστασίας έναντι υπερρευματών.

5.6.3 Συμπέρασμα

Έχοντας υπ' όψιν τα όσα αναφέραμε και αναλύσαμε παραπάνω είναι απαραίτητη η αποτελεσματική προστασία των διαφόρων συσκευών της ανεμογεννήτριας έναντι των επιδράσεων του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και των επικίνδυνων υπερτάσεων που προκαλούνται από την διέλευση του κεραυνικού ρεύματος. Για το λόγο αυτό θωρακίζονται τόσο οι συσκευές όσο και τα καλώδια ενώ γίνεται και χρήση των συστημάτων προστασίας από υπερτάσεις (SPDs)

5.7 Η θωράκιση και η προστασία της γεννήτριας που βρίσκεται στην κορυφή του πύργου [10],[22]

Ένας αποτελεσματικός τρόπος για να προστατευθεί η γεννήτρια από άμεσο πλήγμα κεραυνού είναι να τοποθετηθεί στο εσωτερικό ενός κλειστού χώρου που

θα παρέχει ηλεκτροστατική και ηλεκτρομαγνητική θωράκιση. Αυτός ο χώρος είναι η νασέλλα. Γι' αυτό το λόγο πρέπει να είναι κατασκευασμένη από μεταλλικά φύλλα με συνεχείς ηλεκτρικές συνδέσεις μεταξύ τους. Επίσης πρέπει να υπάρχει καλή σύνδεση μεταξύ του κύριου ρουλεμάν και της νασέλλας όχι μόνο στη βάση της νασέλλας αλλά και στο πάνω μέρος της. Με αυτό τον τρόπο το ρεύμα του κεραυνού οδηγείται εξ' ολοκλήρου στο εξωτερικό μέρος της νασέλλας και έτσι τα εσωτερικά μέρη της νασέλλας παραμένουν ανεπηρέαστα. Ακόμη καλύτερα αν υπάρχουν βούρτσες από καουτσούκ κατά των κραδασμών μεταξύ του κύριου ρουλεμάν και του κιβωτίου ταχυτήτων ή μεταξύ του κιβωτίου ταχυτήτων και της γεννήτριας, τότε δεν περνάει καθόλου ρεύμα από το κιβώτιο ταχυτήτων και την γεννήτρια. Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν κάποια ανοίγματα στην νασέλλα για εξαερισμό και για την είσοδο του άξονα και των καλωδίων, η νασέλλα παρέχει ικανοποιητική προστασία στην γεννήτρια. Ηλεκτρομαγνητική θωράκιση στα ανοίγματα αυτά καθώς και θωράκιση των καλωδίων περιορίζουν το ρεύμα του κεραυνού που εισέρχεται στο εσωτερικό της νασέλλας. Τον ίδιο σκοπό έχει και η χρήση δακτυλιδιών ολίσθησης που οδηγούν μέρος του κεραυνικού ρεύματος από τον άξονα της ανεμογεννήτριας στο εξωτερικό της νασέλλας.

5.7.1 Χρήση απαγωγέων και πυκνωτών υπέρτασης στην γεννήτρια [22]

Είναι πιθανό να εμφανιστούν διαφορές δυναμικού στον εξοπλισμό που βρίσκεται στο εσωτερικό της νασέλλας με αποτέλεσμα να προκληθούν βλάβες λόγω της δημιουργίας ηλεκτρικού τόξου. Αν το πλαίσιο της γεννήτριας βρεθεί σε δυναμικό μεγαλύτερο από το βασικό επίπεδο μόνωσης των περιελίξεών της τότε μπορεί να δημιουργηθεί μία οπή και να χρειαστεί συντήρηση. Η μόνωση της γεννήτριας πρέπει να υφίσταται επίβλεψη και συντήρηση κάθε φορά που εμφανίζεται υπέρταση λόγω κεραυνικού πλήγματος. Ωστόσο λόγω του περιορισμένου διαθέσιμου χώρου οι γεννήτριες δεν μπορούν να μονωθούν στο ίδιο επίπεδο με τις υπόλοιπες ηλεκτρικές συσκευές της ανεμογεννήτριας. Ένας αποδεκτός τρόπος για την προστασία της γεννήτριας απέναντι σε κεραυνικό πλήγμα είναι η χρήση απαγωγέων και πυκνωτών υπέρτασης. Όμως η τοποθέτησή τους στη νασέλλα έχει σαν αποτέλεσμα ένας ήδη μικρός χώρος να γίνει ακόμα μικρότερος προκαλώντας πιθανώς προβλήματα αξιοπιστίας που μπορεί να οδηγήσουν σε κάποιες αλλαγές του σχεδιασμού του συστήματος προστασίας. Αν η νασέλλα

παρέχει αποτελεσματική θωράκιση και τα κύματα που εισέρχονται από τις γραμμές ισχύος είναι επαρκώς εξασθενημένα από το σύστημα προστασίας του μετασχηματιστή τότε δεν είναι απαραίτητη επιπλέον προστασία της γεννήτριας έναντι κυμάτων. Το σύστημα προστασίας που θα παρουσιαστεί προστατεύει την γεννήτρια περιορίζοντας τις τάσεις μεταξύ του αγωγού και της σιδερένιας βάσης της μηχανής καθώς και μεταξύ των στροφών των περιελίξεων. Στην ανάλυση που ακολουθεί η γεννήτρια αντιμετωπίζεται σαν μία γραμμή μετάδοσης με κατανομημένες σταθερές. Η τάση κατά μήκος του αγωγού παράγει τάση μεταξύ των στροφών των τυλιγμάτων και όσο μικρότερος είναι ο ρυθμός ανόδου της τάσης αυτής τόσο μικρότερη είναι και η πίεση που ασκείται μεταξύ των στροφών. Ο ρυθμός ανόδου μπορεί να ελεγχθεί με ένα κύκλωμα που αποτελείται από μία αυτεπαγωγή και μία χωρητικότητα σε σειρά. Αν εφαρμοστεί μια τάση E_a στο κύκλωμα τότε η τάση E_c του πυκνωτή θα ταλαντεύεται μέχρι οι απώλειες του κυκλώματος να αποσβέσουν τις ταλαντώσεις. Η E_c ταλαντεύεται γύρω από την E_a με περίοδο που δίνεται από την σχέση:

$$T = 2\pi(LC)^{1/2}$$

Και ο χρόνος που χρειάζεται για να φτάσει την κορυφή είναι $T/2$. Με κατάλληλη επιλογή των L και C ο χρόνος αυτός μπορεί να κρατηθεί στο ελάχιστο. Η τιμή της E_a καθορίζει τον ρυθμό ανόδου.

Οπότε τρία στοιχεία απαιτούνται για να περιορίσουν τον ρυθμό ανόδου της τάσης μεταξύ των στροφών των περιελίξεων:

1. Μία αυτεπαγωγή
2. Μία χωρητικότητα
3. Ένας τρόπος να περιοριστεί η τάση E_a

Η E_a περιορίζεται στην πράξη από έναν απαγωγέα στα τερματικά των γραμμών του μετασχηματιστή διανομής. Η γεννήτρια συνδέεται παράλληλα με τον πυκνωτή

έτσι ώστε η τάση που εφαρμόζεται από το τερματικό της γεννήτριας στην σιδερένια βάση της μηχανής να είναι E_c . Όμως αυτό το σύστημα από μόνο του δεν θα προστατεύσει την γεννήτρια γιατί η E_c θα μπορούσε να υπερβεί την E_a γεγονός που θέτει σε κίνδυνο την μόνωση μεταξύ του αγωγού και του σιδήρου. Για να εξασφαλιστεί αποτελεσματική προστασία πρέπει η E_c να διατηρηθεί ίση ή μικρότερη από την E_a . Αυτό μπορεί να επιτευχθεί εγκαθιστώντας έναν ακόμα απαγωγέα παράλληλα με τον πυκνωτή. Όταν η E_c φτάσει την τάση αφής του δεύτερου απαγωγέα περιορίζεται. Η αυτεπαγωγή L μπορεί να είναι ένα πηνίο ή μια αυτεπαγωγή κατανεμημένη σε ορισμένο μήκος της γραμμής. Ο πυκνωτής C είναι ειδικά κατασκευασμένος για προστασία απέναντι σε κύματα. Ο απαγωγέας της γραμμής είναι ή ενδιάμεσου τύπου ή τύπου διανομής. Ειδικός απαγωγέας για στρεφόμενες μηχανές πρέπει να χρησιμοποιηθεί για την γεννήτρια. Ο σκοπός ενός απαγωγέα είναι να περιορίσει την κορυφή της τάσης. Για να το πετύχει πρέπει να λειτουργεί σαν μονωτής συνήθως για τάση συχνότητας 60HZ και σαν αγωγός για υψηλά ρεύματα κεραυνού. Όταν το ρεύμα του κεραυνού γίνει αμελητέο πρέπει να λειτουργήσει πάλι σαν μονωτής στην κανονική τάση της γεννήτριας.

5.7.2 Η θωράκιση και η προστασία των καλωδίων [10]

Όπως είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο όταν ένας κεραυνός πλήξει το πτερύγιο της ανεμογεννήτριας το ρεύμα του διαρρέει την νασέλλα και αφού περάσει από το κιβώτιο ταχυτήτων και τον άξονα υψηλής ταχύτητας φτάνει στην γεννήτρια. Έτσι επάγονται υπερτάσεις στα καλώδια των αισθητήρων κατά μήκος του εξωτερικού μέρους του κιβωτίου και της γεννήτριας. Οι τάσεις αυτές μπορούν να μειωθούν αποτελεσματικά με τη θωράκιση των καλωδίων και την όδυσή τους μέσα σε ειδικά κανάλια. Πιο συγκεκριμένα τα καλώδια οδεύουν κοντά στην επιφάνεια της γεννήτριας σε ειδικές διαδρομές που είναι καλά συνδεδεμένες στην κατασκευή. Έτσι οι επαγόμενες τάσεις μειώνονται από αρκετές εκατοντάδες V/m σε μερικές δεκάδες V/m. Επαγόμενες υπερτάσεις μπορεί ακόμα να εμφανιστούν και στα καλώδια που κατευθύνονται από το κιβώτιο ταχυτήτων ή την γεννήτρια προς την βάση της νασέλλας. Το πρόβλημα είναι ότι υπάρχουν ελάχιστες διαθέσιμες διαδρομές για να οδηγηθεί το ρεύμα στην βάση. Έτσι οι πυκνότητες του ρεύματος στα καλώδια αυτά είναι πολύ μεγάλες. Όταν ο κεραυνός πλήξει τα πτερύγια το ρεύμα θα οδηγηθεί στον άξονα οδήγησης, ένα μέρος του θα συνεχίσει προς το

κιβώτιο ταχυτήτων και ένα μικρότερο μέρος θα φτάσει τελικά στην γεννήτρια. Η ποσότητα του ρεύματος που φτάνει τελικά στην γεννήτρια εξαρτάται από το αν η νασέλλα είναι μεταλλική και από τον τρόπο με τον οποίο στοιχεία όπως το κιβώτιο ταχυτήτων και τα ρουλεμάν είναι συνδεδεμένα. Αν χρησιμοποιηθούν μικρά καλώδια τα οποία οδεύουν κοντά στους συνδετικούς ιμάντες τότε μπορεί να επιτευχθεί αξιοσημείωτη μείωση της επαγόμενης τάσης. Αν οδηγηθούν ακριβώς ενάντια στον ιμάντα στις συνδέσεις των καλωδίων τότε θα μειωθεί ακόμη περισσότερο η τάση αλλά στην πράξη είναι συχνά δύσκολο να συνδεθούν ογκώδη καλώδια με αυτόν τον τρόπο. Πιο αποτελεσματική είναι η χρήση μιας πλάκας ή πάλι ενός καναλιού μέσα στο οποίο θα οδεύουν τα καλώδια και που θα πρέπει να είναι καλά στερεωμένο στην κατασκευή και στα δύο άκρα. Περαιτέρω μείωση της τάσης μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση συζευκτών από καουτσούκ έναντι κραδασμών. Το κιβώτιο ταχυτήτων και η γεννήτρια δεν αποτελούν πλέον άμεσο τμήμα της διαδρομής του κεραυνικού ρεύματος αν και πάλι ένα μικρό μέρος του θα αποκλίνει από τη βάση της νασέλλας και θα περάσει στην γεννήτρια

5.8 Προστασία του ηλεκτρονικού συστήματος της ανεμογεννήτριας [22]

Ένα από τα κυριότερα συστήματα μιας ανεμογεννήτριας είναι και το ηλεκτρονικό της σύστημα από το οποίο εξαρτάται και η σωστή λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Αποτελείται από αισθητήρες οι οποίοι ανιχνεύουν διάφορες παραμέτρους όπως είναι η κατεύθυνση και η ένταση του ανέμου, αν υπάρχει επικύρωση πάγου στα πτερύγια κλπ. Σε αυτές τις πληροφορίες βασίζεται η λήψη σωστών αποφάσεων. Αν λοιπόν το ηλεκτρονικό σύστημα δεν είναι επαρκώς προστατευόμενο τότε ενδεχόμενο κεραυνικό πλήγμα θα προκαλέσει λανθασμένες ενδείξεις των αισθητήρων που θα οδηγήσουν σε κακές αποφάσεις σχετικά με την λειτουργία της ανεμογεννήτριας με καταστροφικές συνέπειες. Γι' αυτό το λόγο τα ηλεκτρονικά συστήματα πρέπει να προστατεύονται τόσο από την ολοκληρωτική καταστροφή όσο και από μία απλή δυσλειτουργία που μπορεί να προκαλέσει ένα κεραυνικό πλήγμα. Υπάρχουν δύο φιλοσοφίες στις οποίες μπορεί να βασιστεί ο σχεδιασμός του συστήματος προστασίας του ηλεκτρονικού συστήματος της ανεμογεννήτριας.

Στην πρώτη υπάρχουν διαφορετικές περιοχές κάθε μία από τις οποίες μειώνει

δραστικά την υπέρταση. Είναι πιθανό να υπάρχει ένα εξωτερικό στρώμα θωράκισης που μειώνει αποτελεσματικά το κυρίως μέρος της ενέργειας του κεραυνού. Οι διατάξεις προστασίας αυτού του στρώματος μπορεί να αποκρίνονται λίγο πιο αργά από την αρχική άνοδο της υπέρτασης, μπορούν όμως να αντέξουν και τελικά να την περιορίσουν. Ωστόσο μέσα σε αυτό το εξωτερικό στρώμα υπάρχει μία περιοχή όπου εμφανίζεται μία μικρή παραμένουσα υπέρταση η οποία όμως αντιμετωπίζεται από άλλα γρηγορότερα μέσα προστασίας. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται (με διαδοχικά στρώματα προστασίας) μέχρι τελικά η παραγόμενη υπέρταση να έχει μειωθεί σε επιτρεπτά επίπεδα και η υπό προστασία ηλεκτρονική συσκευή να μην απειλείται. Στην δεύτερη φιλοσοφία αναφέρεται σε διαφορετικά επίπεδα προστασίας δηλαδή σε διαφορετικά επίπεδα ενέργειας και τάσης στα οποία λειτουργούν τα διάφορα μέσα προστασίας. Για παράδειγμα οι γραμμές κοινής ωφέλειας έχουν μεγάλες ασφάλειες και απαγωγείς υπέρτασης που απορροφούν μεγάλο μέρος της ενέργειας του κεραυνού και μειώνουν την παραγόμενη υπέρταση στα επιτρεπτά για τις γραμμές τοπικών παροχών επίπεδα. Στις γραμμές τοπικών παροχών υπάρχουν μέσα προστασίας με μικρότερη τάση λειτουργίας τα οποία μειώνουν περαιτέρω την υπέρταση. Η διαδικασία συνεχίζεται με διαδοχικά επίπεδα έως ότου η παραγόμενη υπέρταση να μειωθεί σε αποδεκτά επίπεδα και να μην κινδυνεύει η υπό προστασία συσκευή.

5.8.1 Τεχνικές προστασίας του ηλεκτρονικού συστήματος της ανεμογεννήτριας [22]

Οι βασικές τεχνικές προστασίας που χρησιμοποιούνται για την προστασία του ηλεκτρονικού συστήματος της ανεμογεννήτριας είναι δύο:

1. Η εκτροπή της υπέρτασης που εμφανίζεται στο σύστημα
2. Η θωράκιση του συστήματος έναντι υπερτάσεων

Επιπλέον κατά την διάρκεια δυσλειτουργίας του συστήματος λόγω κεραυνικού πλήγματος είναι συχνά απαραίτητο να διατηρηθούν ορισμένα ηλεκτρονικά δεδομένα ζωτικής σημασίας μέχρι να επιστρέψει το σύστημα στην κανονική λειτουργία.

Εκτροπή της υπέρτασης που εμφανίζεται στην ανεμογεννήτρια [22]

Αυτή η μέθοδος προστασίας επιτυγχάνεται με δύο βασικούς τρόπους. Ο πρώτος είναι να οδηγηθεί το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας της υπέρτασης κατά μήκος μιας σχετικά ασφαλούς και προκαθορισμένης διαδρομής έτσι ώστε τα στοιχεία της ανεμογεννήτριας να παρακαμφθούν και να μην υποστούν βλάβες. Η διαδρομή αυτή αποτελείται από το αλεξικέραυνο, τον αγωγό καθόδου και την γείωση. Ο δεύτερος τρόπος είναι να χρησιμοποιηθούν συσκευές σε κομβικές θέσεις για να παρεκκλίνουν εκείνο το μέρος της ενέργειας που δεν ρέει μέσω της προκαθορισμένης διαδρομής. Γενικά το ρεύμα πρέπει να οδηγείται στην γη χωρίς να περνάει μέσα ή κοντά από τις ηλεκτρονικές διατάξεις της ανεμογεννήτριας. Αυτό σημαίνει ότι οι ηλεκτρονικές διατάξεις πρέπει να τοποθετούνται μακριά από τους αγωγούς καθόδου, τα πόδια του πύργου, τα καλώδια υποστήριξης κλπ. Όσο πιο μεγάλη είναι η απόσταση της διαδρομής ροής του κεραυνικού ρεύματος από τον ηλεκτρικό εξοπλισμό τόσο ασθενέστερο είναι το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο. Αν αυτό δεν είναι εφικτό τότε πρέπει να εξασφαλιστεί ότι το ρεύμα περνάει γύρω από τα ηλεκτρονικά στοιχεία σε ίσες αποστάσεις έτσι ώστε να αλληλοεξουδετερώνονται τα ίσα και αντίθετα μαγνητικά πεδία δίνοντας μηδενικό συνολικό πεδίο. Η θωράκιση των ηλεκτρονικών συσκευών μπορεί να μειώσει ακόμη περισσότερο τις επιδράσεις των μεταβαλλόμενων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων. Ιδανική θωράκιση αποτελεί μία κλειστή κυλινδρική συμπαγής και αγωγίμη κατασκευή (κλωβός Faraday) της οποίας η εξωτερική επιφάνεια χρησιμεύει για να οδηγήσει το ρεύμα στο έδαφος. Θεωρητικά το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της είναι μηδενικό. Τέλος το ρεύμα διαχέεται στο έδαφος μακριά από ηλεκτρονικό εξοπλισμό και γραμμές ισχύος.

Οι διατάξεις προστασίας που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν απαγωγείς, ρελαί και συσκευές περιορισμού. Η λειτουργία τους βασίζεται στην αρχή ότι η σύνθετη αντίσταση της επιθυμητής διαδρομής ροής είναι μικρότερη από αυτήν της διαδρομής που θέλουμε να προστατεύσουμε. Για να μπορέσει να περιορίσει την τάση μία τέτοια διάταξη χρειάζεται και μία σύνθετη αντίσταση σειράς, το μέγεθος της οποίας είναι καθοριστικής σημασίας. Μερικές φορές το υπάρχον καλώδιο μπορεί να παίξει τον ρόλο σύνθετης αντίστασης. Τα ρελαί συνήθως συνδέονται μέσω καλωδίου με το σύστημα έτσι ώστε όταν το ρεύμα ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή να διακόψουν το κύκλωμα. Έχουν αργή απόκριση και κατασκευάζονται για να

χρησιμοποιούνται ως διακόπτες φορτίου. Οι συσκευές περιορισμού είναι ένας τύπος απαγωγέα και αναφέρονται συνήθως σε διατάξεις όπως σωλήνες αερίου. Συσκευές με ταχύτερη απόκριση περιλαμβάνουν βαρύτερες διόδους zener και ειδικές διόδους περιορισμού που ονομάζονται Transorb (TM). Γενικά όσο γρηγορότερη απόκριση έχει μια διάταξη τόσο λιγότερη ενέργεια μπορεί να διαχειριστεί και τόσο πιο κοντά στην προστατευόμενη συσκευή τοποθετείται.

Προστασία έναντι ηλεκτρομαγνητικού πεδίου [22]

Πρόκειται είτε για μια κλειστή κατασκευή που περικλείει την υπό προστασία συσκευή ή για ένα καλώδιο που οδηγεί το ρεύμα του κεραυνού στο έδαφος χωρίς να περάσει από την συσκευή. Η θωράκιση έναντι ηλεκτρικού πεδίου εξαρτάται από την κατανομή του επιφανειακού φορτίου στην θωράκιση έτσι ώστε να εμποδιστεί η ηλεκτρική ροή που παράγεται από εξωτερικά ηλεκτρικά φορτία. Η θωράκιση έναντι μαγνητικού πεδίου εξαρτάται από την ευθυγράμμιση των μαγνητικών διπόλων στην θωράκιση ώστε να εμποδιστούν οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου που προέρχονται από εξωτερικές ροές ρευμάτων ή μαγνητισμένες εξωτερικές πηγές. Συνήθως η θωράκιση αποτελείται από πολλά στρώματα. Με την χρήση των κατάλληλων υλικών και την προσεκτική κατασκευή μπορεί να εξασφαλιστεί θωράκιση της τάξης των 40 decibel ή και περισσότερο από κάθε στρώμα. Αν απαιτείται θωράκιση σε μία συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων μπορεί να υπάρχουν συνδέσεις μεταξύ θωρακίσεων σε άλλες συχνότητες. Δύο στρώματα θωράκισης το ένα μέσα στο άλλο που παρέχουν θωράκιση 40 decibel το καθένα, δίνουν συνολική θωράκιση της τάξης των 80 decibel.

$$\text{Decibel} = 10 \log(P1/P2) \text{ όπου,}$$

P1 είναι η ισχύς εκτός της θωράκισης και P2 η ισχύς εντός αυτής. Κάθε στρώμα πρέπει να είναι χωρισμένο από τα υπόλοιπα για το φάσμα συχνοτήτων της θωράκισης. Αν δύο στρώματα συνδεθούν μεταξύ τους μέσω μίας διαδρομής χαμηλής αντίστασης σε κάποια περιοχή συχνοτήτων τότε θα έχουμε κατανομή φορτίου ανάμεσά τους και θα υποβιβαστούν σε ένα ενιαίο στρώμα στην περιοχή αυτή. Γενικά η θωράκιση είναι πιο αποτελεσματική όσο αυξάνεται η συχνότητα.

5.9 Σύστημα γείωσης της ανεμογεννήτριας [10],[22],[20],[23]

Σκοπός του συστήματος γείωσης είναι να διαχέεται το ρεύμα του κεραυνού προς το έδαφος μέσω των ηλεκτροδίων γείωσης χωρίς να αναπτύσσονται επικίνδυνες υπερτάσεις, να συνδέει ισοδυναμικά τους αγωγούς καθόδου όπου αυτό είναι εφικτό, να περιορίζει την ανύψωση του δυναμικού του εδάφους στην περιοχή του και τέλος να αναχαιτίζει τον κεραυνό στην περίπτωση επιφανειακής διάσπασης του εδάφους.

5.9.1 Ορισμοί

1. Ηλεκτρόδιο γείωσης: Είναι ένας αγωγός που βρίσκεται σε αγώγιμη επαφή με τη γη, ή ένας αγωγός στο σκυρόδεμα, ο οποίος είναι σε επαφή με τη γη μέσω μιας μεγάλης επιφάνειας.

2. Γη αναφοράς (άπειρη γη): Το μέρος της γης εκτός της περιοχής επιρροής ενός ηλεκτροδίου γείωσης ή ένας συστήματος γείωσης όπου μεταξύ δύο σημείων δεν εμφανίζεται καμία διαφορά δυναμικού λόγω του ρεύματος που ρέει στην γη.

3. Οριζόντιο ηλεκτρόδιο γείωσης: Είναι ένα οριζόντιο θαμμένο ηλεκτρόδιο γείωσης.

4. Ράβδος γείωσης: Είναι ένα κάθετα θαμμένο ηλεκτρόδιο γείωσης.

5. Αγωγός γείωσης: Είναι ένας αγωγός που συνδέει ένα μέρος της εγκατάστασης που πρέπει να γειωθεί σε ένα ηλεκτρόδιο γείωσης ή ένας αγωγός ο οποίος συνδέει ηλεκτρόδια γείωσης και βρίσκεται εκτός του εδάφους ή είναι θαμμένος στο έδαφος και μονωμένος από αυτό.

6. Αγωγός σύνδεσης: Είναι ένας αγωγός που εξασφαλίζει ισοδυναμικές συνδέσεις.

7. Ισοδυναμική σύνδεση: Είναι η αγώγιμη σύνδεση μεταξύ αγώγιμων μερών για να μειωθεί η διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε αυτά τα μέρη.

8. Σύστημα γείωσης: Είναι ένα τοπικά περιορισμένο σύστημα από αγωγήμα συνδεδεμένα ηλεκτρόδια γείωσης ή μεταλλικά μέρη ισοδύναμη αποτελεσματικότητας (βάσεις θεμελίων πύργου, οπλισμοί, μεταλλικά περιβλήματα καλωδίων) από αγωγούς γείωσης και αγωγούς συνδέσεων.

9. Ανύψωση δυναμικού της γης: Είναι η τάση σε ένα σύστημα γείωσης και στη γη αναφοράς.

10. Τάση επαφής: Είναι το μέρος της ανύψωσης δυναμικού της γης που μπορεί να δεχθεί ο άνθρωπος και οφείλεται σε σφάλματα γης υποθέτοντας ότι το ρεύμα ρέει μέσω του ανθρώπινου σώματος από τα χέρια στα πόδια.

11. Βηματική τάση: Είναι το μέρος της ανύψωσης δυναμικού της γης που μπορεί να δεχθεί ένας άνθρωπος με άνοιγμα ποδιών 1m, υποθέτοντας ότι το ρεύμα ρέει μέσω του ανθρώπινου σώματος από το ένα πόδι στο άλλο.

12. Μεταφερόμενα δυναμικά: Είναι μία ειδική περίπτωση των τάσεων επαφής όπου μια τάση μεταφέρεται από την ανεμογεννήτρια σε ένα απομακρυσμένο σημείο εξωτερικά της ανεμογεννήτριας.

5.9.2 Ο ρόλος του εδάφους [10]

Η αποτελεσματικότητα ενός συστήματος γείωσης εξαρτάται πάρα πολύ από την ειδική αντίσταση του εδάφους. Από ηλεκτρική σκοπιά η γη είναι ένα μη ομογενές, ανισότροπο, μη γραμμικό και με διαδοχικά επίπεδα μέσο. Επιπρόσθετα η ηλεκτρική συμπεριφορά της είναι η συνάρτηση της περιεχόμενης υγρασίας, της χαμηλής σύνθεσης, της θερμοκρασίας και της πίεσης. Ο πίνακας 5.14 δείχνει τις τυπικές τιμές της ειδικής αντίστασης συγκεκριμένων εδαφών αλλά οι τιμές αυτές ποικίλουν πολύ.

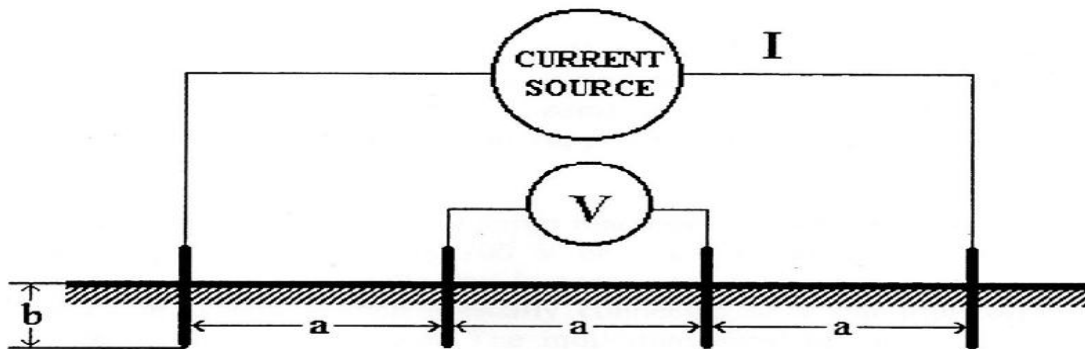
Τύπος εδάφους	Ειδική αντίσταση σε Ωm
Χουμώδες έδαφος, βάλτος	30-100
Υγρή άμμος	200
Αμμώδες έδαφος, ξερό	500
Ξερή άμμος	1000
Πετρώδες έδαφος	3000

Πίνακας 5.14: Τυπικές τιμές της ειδικής αντίστασης συγκεκριμένων εδαφών

Επειδή οι τιμές της ειδικής αντίστασης γείωσης του εδάφους ποικίλουν πολύ ο μόνος ικανοποιητικός τρόπος για την εύρεση της τιμής της είναι να μετριέται κάθε φορά απ' ευθείας η ειδική αντίσταση γείωσης. Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι για την μέτρηση της ειδικής αντίστασης της γης. Όλες οι μέθοδοι περιλαμβάνουν το πέρασμα του

ρεύματος μέσω αυτής της αντίστασης και της μέτρησης της πτώσης τάσης κατά μήκος της. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι αυτή των τεσσάρων σημείων – ακροδεκτών (μέθοδος Wenner). Για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου η γη θεωρείται ότι είναι ένα ομογενές ισότροπο μέσο. Άλλοι μέθοδοι που διεξάγονται με την βοήθεια υπολογιστή μπορούν να αναλύσουν τύπους εδαφών με πολλά επίπεδα.

5.9.3 Η μέθοδος των 4 ακροδεκτών του Wenner για την μέτρηση της ειδικής αντίστασης [10]



Εικόνα 5.38: Η μέθοδος των 4 ακροδεκτών για την μέτρηση της ειδικής αντίστασης [10]

Με την μέθοδο του Wenner για την μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους έχουμε τέσσερα μικρά ηλεκτρόδια μονωμένα εκτός από ένα σημείο στις άκρες του εισέρχονται κάθετα στη γη σε ίση απόσταση [a] μεταξύ τους. Οι άκρες των ηλεκτροδίων βρίσκονται σε βάθος [b]. Ένα ρεύμα I περνάει ανάμεσα στα εξωτερικά ηλεκτρόδια και μια διαφορά δυναμικού V μετριέται μεταξύ των εσωτερικών ηλεκτροδίων. Η κοινή αντίσταση R ορίζεται ως ο λόγος V/I.

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot R}{1 + \frac{2 \cdot a}{(a^2 + 4 \cdot b^2)^{1/2}} - \frac{a}{(a^2 + b^2)^{1/2}}}$$

Όταν το $b < 0.1$ η παραπάνω εξίσωση γίνεται ως εξής:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R$$

Και πρέπει στο σημείο αυτό να τονιστεί ότι η ειδική αντίσταση του εδάφους σε κάθε θέση είναι δυνατό να ποικίλει κατά την διάρκεια ενός έτους καθώς το περιεχόμενο της υγρασίας του εδάφους μεταβάλλεται. Γι' αυτό η ειδική αντίσταση του εδάφους πρέπει να μετριέται πολλές φορές κατά την διάρκεια ενός έτους.

5.9.4 Αντίσταση γείωσης [22]

Πρέπει να αναφερθεί ότι είναι πολύ σημαντικό η αντίσταση γείωσης να έχει όσο το δυνατόν χαμηλότερη τιμή γιατί έτσι μειώνονται δραστικά οι τάσεις επαφής και οι βηματικές τάσεις. Επίσης περιορίζονται οι μέγιστες τάσεις κατά μήκος του πύργου συμβάλλοντας έτσι στην προστασία των ηλεκτρονικών συσκευών αλλά και άλλων ευάλωτων στοιχείων της ανεμογεννήτριας. Ο αρχικός παλμός του κεραυνικού ρεύματος διασχίζει τον πύργο προς τα κάτω. Αν στο τέλος της διαδρομής δεν συναντήσει γείωση ή συναντήσει σύστημα γείωσης με πολύ μεγάλη αντίσταση τότε ένας παλμός τάσης ίδιου μεγέθους αντανακλάται και κατευθύνεται προς το σημείο πλήγματος διπλασιάζοντας τις τάσεις ανά μονάδα μήκους. Μια τέτοια κατάσταση σε μια ανεμογεννήτρια μπορεί να προκαλέσει διάσπαση των μονώσεων, αναφλέξεις και να απειλήσει την ασφάλεια του προσωπικού. Γι' αυτό αν σχεδιαστεί σύστημα γείωσης με πολύ χαμηλή αντίσταση τότε αντανακλάται ένας παλμός τάσης με αντίθετη πολικότητα από τον αρχικό παλμό ρεύματος προκαλώντας σημαντική μείωση της πτώσης τάσης κατά μήκος του πύργου. Υπάρχει όμως και μία αρνητική συνέπεια γιατί καθώς το επιστρέφον κύμα τάσης συνοδεύεται από ένα κύμα ρεύματος, αυξάνονται τα ρεύματα και οι τάσεις που επάγονται μέσω μαγνητικής σύζευξης.

5.9.5 Η συνηθισμένη χρήση των ηλεκτροδίων για την αντίσταση γείωσης [22]

•Κατακόρυφη ράβδος: Χρησιμοποιείται για να μειώσει την αντίσταση γείωσης σε περιοχές με χαμηλή ειδική αντίσταση εδάφους, γείωση του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας.

•Οριζόντιος αγωγός: Χρησιμοποιείται ενώνοντας ωριστά συστήματα γείωσης. Μειώνει την σύνθετη αντίσταση γείωσης όταν η ειδική αντίσταση εδάφους δεν

μειώνεται με το βάθος.

•Ηλεκτρόδιο τύπου δακτυλίου: Χρησιμοποιείται γύρω από ιστούς και πύργους ανεμογεννήτριας. Επίσης χρησιμοποιείται πολλές φορές ένας αριθμός ξεχωριστών δακτυλίων.

5.9.6 Τύποι ηλεκτροδίων γείωσης σύμφωνα με τους κανονισμούς του IEC 62305 [12],[16],[22]

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες διάταξης των ηλεκτροδίων γείωσης, η διάταξη τύπου A και η διάταξη τύπου B.

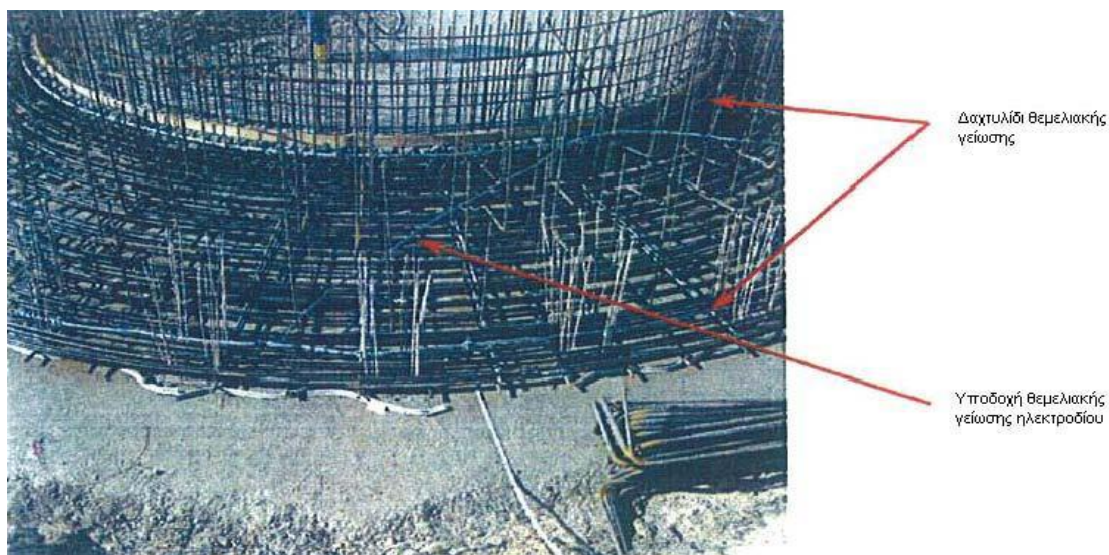
$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R$$

Διάταξη τύπου A

Η διάταξη τύπου A περιλαμβάνει ακτινικά οριζόντια ή κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης. Κάθε αγωγός καθόδου πρέπει να συνδέεται τουλάχιστον σε ένα ανεξάρτητο ηλεκτρόδιο γείωσης ενώ ο ελάχιστος συνολικός αριθμός ηλεκτροδίων γείωσης πρέπει να είναι δύο. Τα ηλεκτρόδια γείωσης πρέπει να αλληλοσυνδέονται μέσω δακτυλίου ισοδυναμικής σύνδεσης ή ισοδυναμικών ζυγών στην κατασκευή. Διάταξη τύπου A θεωρείται και μία διάταξη ηλεκτροδίων γείωσης που επιπρόσθετα περιλαμβάνει περιμετρικό δακτύλιο ισοδυναμικής σύνδεσης των αγωγών καθόδου ο οποίος βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος σε ποσοστό μικρότερο από το 80% του συνολικού μήκους του.

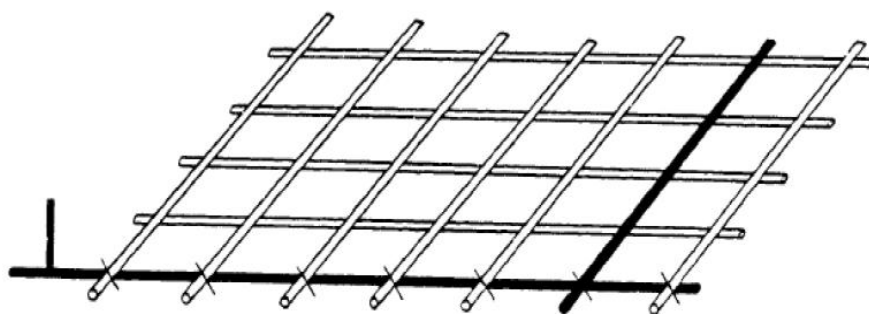
Διάταξη τύπου B

Η διάταξη τύπου B αποτελείται από ένα περιμετρικό ηλεκτρόδιο γείωσης τύπου δακτυλίου εξωτερικά της κατασκευής με τουλάχιστον το 80% του μήκους του σε επαφή με το έδαφος ή από ένα ηλεκτρόδιο θεμελιακής γείωσης. Σε μια ανεμογεννήτρια συνήθως χρησιμοποιείται διάταξη τύπου B με ηλεκτρόδιο τύπου δακτυλίου να τοποθετείται περιμετρικά και το οποίο συνδέεται με το ενισχυμένο σκυρόδεμα των θεμελίων.



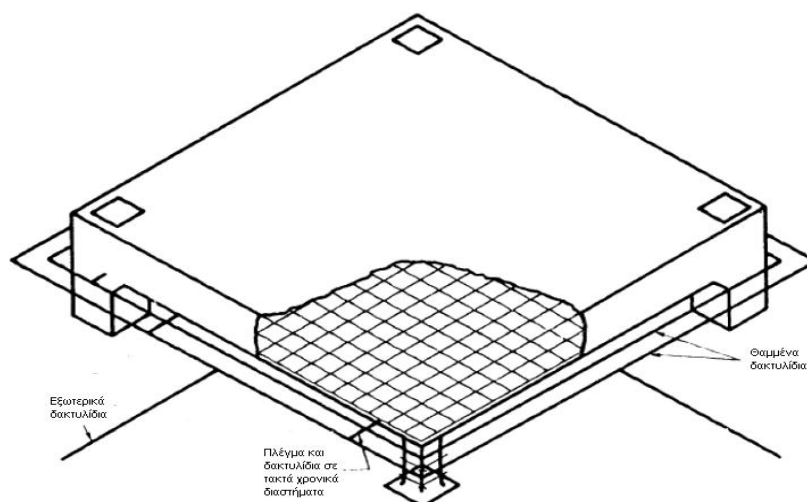
Εικόνα 5.39: Εγκατάσταση θεμελιακού ηλεκτροδίου γείωσης [16]

Επειδή ασκούνται μεγάλες δυνάμεις από τον άνεμο στην ανεμογεννήτρια είναι απαραίτητη μια βάση πύργου με αξιοσημείωτη μηχανική αντοχή. Μία βάση από ενισχυμένο σκυρόδεμα ικανοποιεί αυτό το σκοπό αλλά ταυτόχρονα συμβάλλει και στον σχεδιασμό μίας αποτελεσματικής διαδρομής όδευσης του κεραυνικού ρεύματος προς τη γη. Για ακόμη περισσότερη μηχανική ενίσχυση της βάσης χρησιμοποιούνται ενισχυτικές μπάρες στο εσωτερικό του σκυροδέματος που και αυτές μπορούν να συμβάλλουν στην οδήγηση του ρεύματος προς τη γη. Ο αριθμός των ισχυρά διασυνδεδεμένων μπαρών αλλά και το μήκος της κάθε μπάρας πρέπει να επιλέγουν έτσι ώστε το συσσωρευμένο μήκος αυτού του συστήματος μπαρών να είναι τουλάχιστον 6 μέτρα. Έτσι δημιουργείται ένα πλέγμα μεγάλης έκτασης το οποίο εξασφαλίζει μικρές πυκνότητες ρεύματος περιορίζοντας έτσι τις θερμικές βλάβες και τις διασπάσεις.



Εικόνα 5.40: Πλέγμα διασυνδεδεμένων μπαρών [22]

Όμως εκτός από το σύστημα των ενισχυτικών μπαρών πάντα χρησιμοποιούνται ένα ή περισσότερα ηλεκτρόδια τύπου δακτυλίου εξωτερικά της ανεμογεννήτριας σε απόσταση τουλάχιστον 1m από τους εξωτερικούς τοίχους και θαμμένα σε βάθος τουλάχιστον 0.5m. Τα ηλεκτρόδια αυτά χρησιμοποιούνται γιατί εξασφαλίζουν εξίσωση δυναμικών στο έδαφος γύρω από την βάση του πύργου, μειώνουν τις τάσεις επαφής και τις βηματικές τάσεις γύρω από την βάση του πύργου καθιστώντας εφικτή την πρόσβαση στην περιοχή αυτή και τέλος αποτρέπουν την επιφανειακή διάσπαση του εδάφους ή την διάσπαση εντός του σκυροδέματος. Επίσης ο αριθμός των επιπλέον ηλεκτροδίων δεν πρέπει να είναι μικρότερος από τον αριθμό των αγωγών καθόδου με ελάχιστη τιμή 2. Δηλαδή αν χρησιμοποιηθεί σαν αγωγός καθόδου ο πύργος της ανεμογεννήτριας τότε θα πρέπει να τοποθετηθούν δυο επιπλέον ηλεκτρόδια. Οι ανεμογεννήτριες είναι συνήθως εγκατεστημένες σε βραχώδεις ή ξηρές περιοχές και γενικά σε περιοχές με υψηλή αντίσταση εδάφους και γι' αυτό για να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή της αντίστασης χρησιμοποιούνται επιπρόσθετα ηλεκτρόδια γείωσης τα οποία συνδέονται στο εξωτερικό ηλεκτρόδιο. Τα επιπρόσθετα ηλεκτρόδια γείωσης είναι ακτινικά θαμμένοι αγωγοί που μπορούν να επιμηκυνθούν τόσο όσο χρειάζεται για να μειωθεί η τιμή της αντίστασης. Για πολύ βραχώδη εδάφη οι αγωγοί αυτοί τοποθετούνται στην επιφάνεια του εδάφους.



Εικόνα 5.41: Σύστημα γείωσης αποτελούμενο από πλέγμα μπαρών, δύο ηλεκτρόδια τύπου δακτυλίου και επιπρόσθετα ηλεκτρόδια γείωσης [22]

5.9.7 Μέθοδοι γείωσης μιας ανεμογεννήτριας [22]

Η γείωση μιας ανεμογεννήτριας γίνεται τοποθετώντας ένα ηλεκτρόδιο τύπου δακτυλίου γύρω από τα θεμέλια και συνδέεται μέσω των θεμελίων με τον πύργο της ανεμογεννήτριας. Κάθετοι ράβδοι ή οριζόντια ηλεκτρόδια συνδέονται συχνά με το δακτυλιοειδές ηλεκτρόδιο γείωσης ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη τιμή της αντίστασης γείωσης. Σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα, τιμή της αντίστασης γείωσης μικρότερη ή ίση με 10Ω θεωρείται κατάλληλη για τους σκοπούς του συστήματος της αντικεραυνικής προστασίας. Σε ένα αιολικό πάρκο το ηλεκτρόδιο γείωσης τύπου δακτυλίου είναι ένα μέρος μόνο ενός πολύ μεγαλύτερου συστήματος γείωσης. Σε ένα αιολικό πάρκο το σύστημα των καλωδίων συνδέεται σε ένα μετασχηματιστή με το πρωτεύον του τύλιγμα σε συνδεσμολογία αστέρα ή στον υποσταθμό του πάρκου. Οι ξεχωριστές γειώσεις κάθε ανεμογεννήτριας είναι συνδεδεμένες μέσω της μεταλλικής θωράκισης των καλωδίων ισχύος. Αυτό συντελεί στο να μειωθεί η συνολική σύνθετη αντίσταση γείωσης σε μια χαμηλή τιμή.

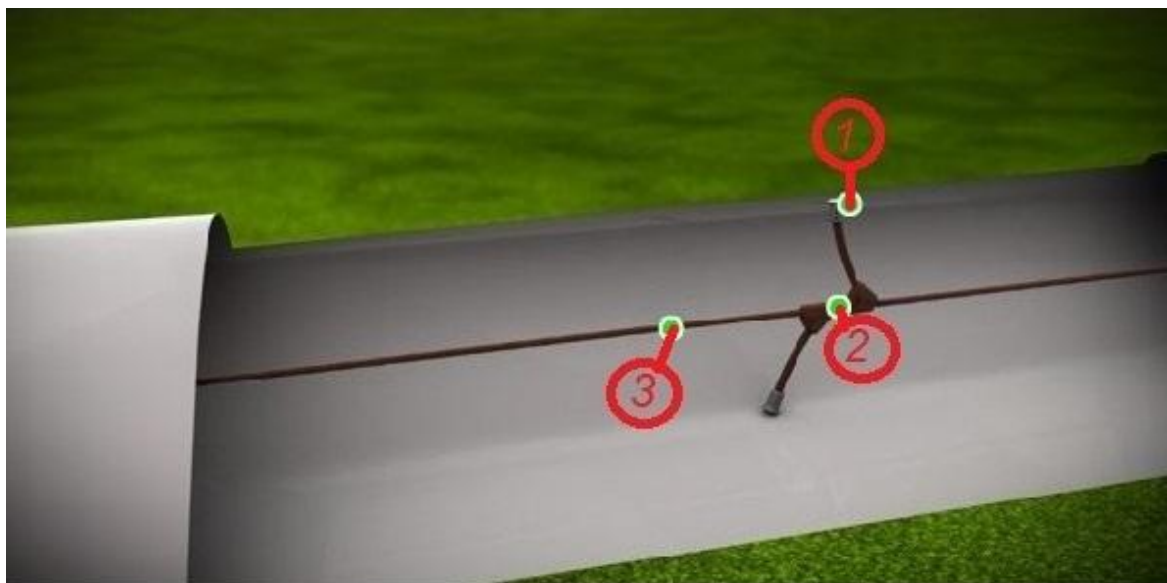
5.10 Εγκατάσταση αντικεραυνικού συστήματος προστασίας στα διάφορα μέρη της ανεμογεννήτριας. [24]

Αφού περιγράψαμε τα διάφορα συστήματα αντικεραυνικής προστασίας της Α/Γ, καθώς και μεθόδους που βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο, θα παρουσιάσουμε την πλήρη εγκατάσταση ενός συστήματος αντικεραυνικής προστασίας της εταιρείας *ERICO*. Η εταιρεία αυτή είναι μία από τις μεγαλύτερες βιομηχανίες παγκοσμίως που ειδικεύονται σε τέτοιου είδους κατασκευές.

Στη συνέχεια θα ακολουθήσουν εικόνες από τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε μια τέτοια εγκατάσταση, περιγραφή αυτών των υλικών, αλλά και ο τρόπος τοποθέτησης τους πάνω στα διάφορα μέρη της Α/Γ.

5.10.1 Αντικεραυνική προστασία πτερυγίων. [24]

Στην εικόνα 5.42 απεικονίζεται η τομή του πτερυγίου και ο τρόπος τοποθέτησης του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας σε αυτό.



Εικόνα 5.42 : Τομή πτερυγίου ΑΓ [24]

1. *Παραλήπτης(receptor)*. Προσελκύει το κεραυνικό πλήγμα στο επιθυμητό σημείο του πτερυγίου.



Εικόνα 5.43 : Παραλήπτης. [24]

2. *Συνδέσεις(connections)*. Μπορεί να είναι μια στενά ενωμένη σύνδεση ή μια μηχανική κοχλιωμένη σύνδεση. Παρέχει αντίσταση στις δονήσεις αλλά και στην οξείδωση.



Εικόνα 5.45 : Συνδέσεις. [24]

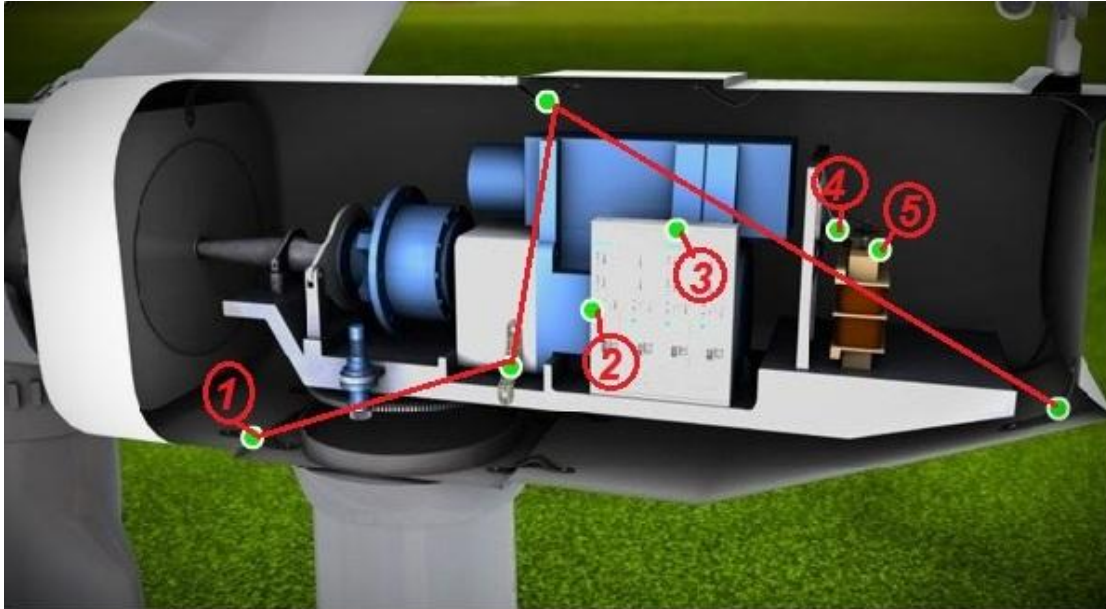
3. *Αγωγοί(conductors)*. Οι αγωγοί έχουν χαμηλή αυτεπαγωγή ανά μονάδα μήκους. Ανθεκτικοί στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και στις μηχανικές καταπονήσεις. Κατασκευάζονται από αλουμίνιο, χαλκό και ανοξείδωτο χάλυβα. Υπάρχουν μονωμένοι και μη μονωμένοι αγωγοί. Επίσης κατασκευάζονται πλεκτοί αγωγοί και στα δύο επίπεδα με στρογγυλεμένους σχηματισμούς.



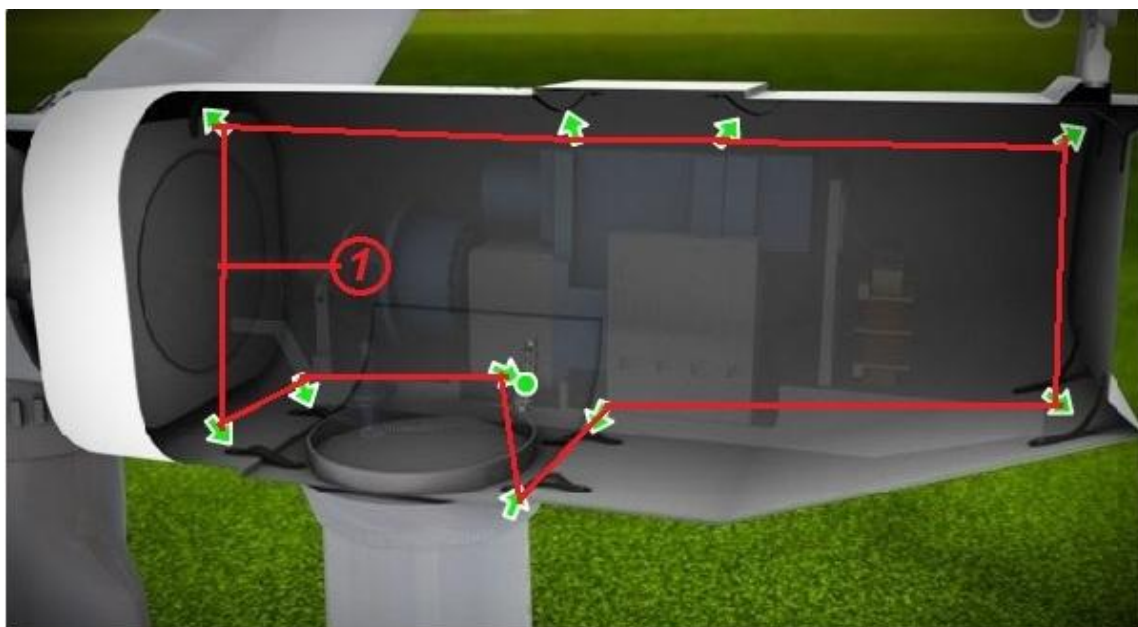
Εικόνα 5.45 : Αγωγοί. [24]

5.10.2 Αντικεραυνική προστασία νασέλλας. [24]

Στις εικόνες 5.43 και 5.44 απεικονίζεται το εσωτερικό της νασέλλας μιας Α/Γ και ο τρόπος τοποθέτησης του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας μέσα σε αυτή



Εικόνα 5.46 : Εσωτερικό νασέλλας Α/Γ.[24]



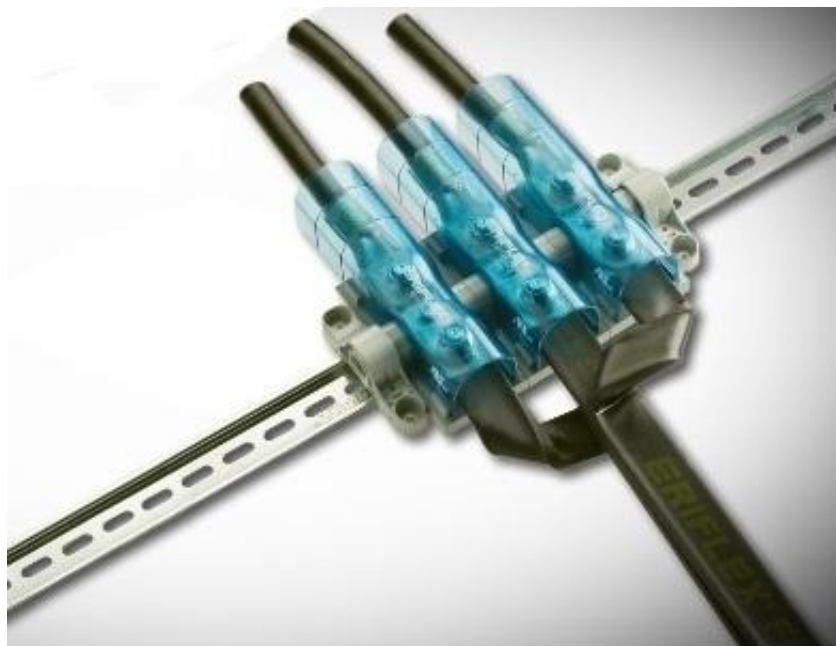
Εικόνα 5.47 : Εσωτερικό νασέλλας Α/Γ. [24]

1. *Σιρίτι γείωσης (Grounding braid)*. Είναι κατασκευασμένα από κασιτερωμένα πλεκτά χάλκινα καλώδια και έχουν χαμηλή αντίσταση επαφής. Το κάθε σιρίτι είναι τρυπημένο στα άκρα του για να συνδέεται εύκολα.



Εικόνα 5.48 : Σιρίτι γείωσης . [24]

2. *Φραγμός ισχύος (power block)*. Τα power blocks είναι τα σημεία εισόδου για την ισχύ που παράγεται από την ανεμογεννήτρια και κατευθύνεται προς τον inverter. Κατασκευάζονται από χαλκό και παρέχουν μεγάλη αγωγιμότητα.



Εικόνα 5.49 : Power block. [24]

3. Ζυγοί διανομής(*Eriflex flexibar and braids*). Είναι μια αποτελεσματική και εναλλακτική λύση στη χρησιμοποίηση καλωδίων. Αυτοί οι ζυγοί βελτιώνουν την πυκνότητα της ισχύος μέσα στη νασέλλα, είναι εύκαμπτοι, μονωμένοι και εξοικονομούν χώρο και βάρος μέσα στη νασέλλα.



Εικόνα 5.50 : Ζυγοί διανομής. [24]

4. Αγωγοί(*conductors*). Οι ίδιοι με αυτούς που χρησιμοποιούνται και στα πτερύγια



Εικόνα 5.51 : Αγωγοί. [24]

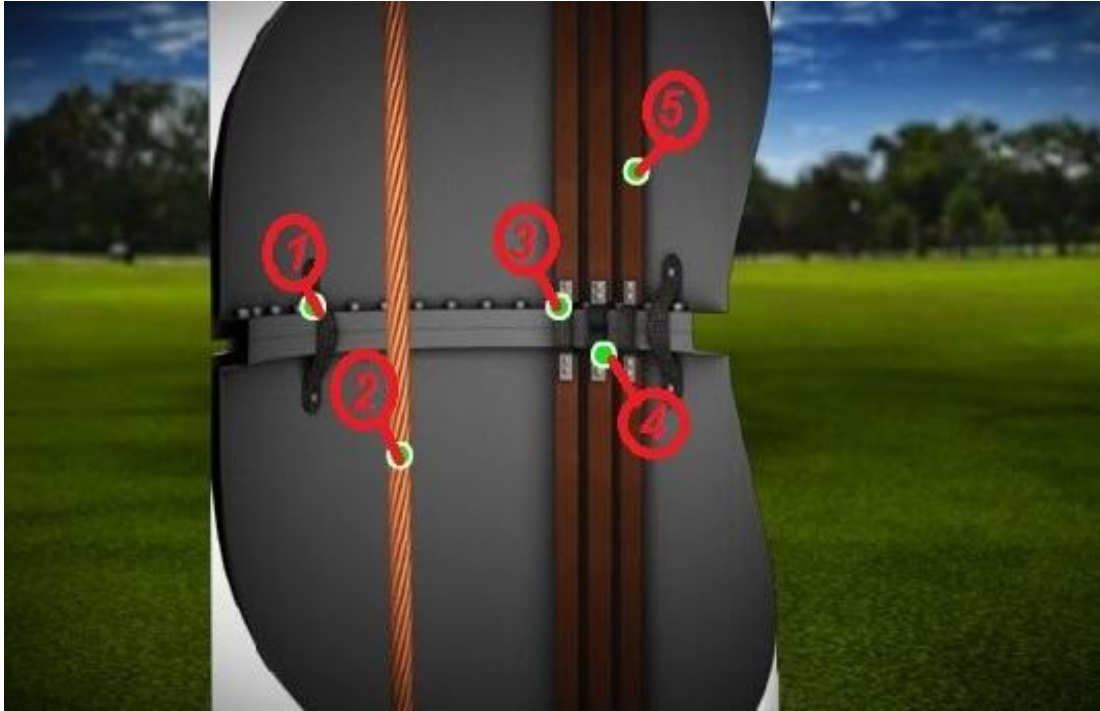
5. Χαμηλής τάσης μονωτήρας (Low voltage insulator). Κατασκευάζεται από στιβαρό πολυαμίδιο εμπλουτισμένο με ίνες γυαλιού. Το εσωτερικό αποτελείται από γαλβανισμένο χάλυβα. Έχει πολύ υψηλή αντίσταση σε ρεύματα διαρροής και δουλεύει σε θερμοκρασίες $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $+130\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Εικόνα 5.52 : Μονωτήρας. [24]

5.10.3 Αντικεραυνική προστασία πύργου. [24]

Στην εικόνα 5.53 παρατηρούμε το εσωτερικό του πύργου της ανεμογεννήτριας και την τοποθέτηση του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας μέσα σε αυτόν



Εικόνα 5.53 : Εσωτερικό πύργου. [24]

1. Σίρπι γείωσης(*Grounding braid*). Είναι το ίδιο με αυτά που χρησιμοποιούνται στη νασέλλα.
2. Αγωγοί(*conductors*). Οι ίδιοι με αυτούς που χρησιμοποιούνται και στα πτερύγια.
3. Ζυγοί διανομής(*Eriflex flexibar and braids*). Παρόμοιοι με αυτούς που χρησιμοποιούνται και στη νασέλλα.



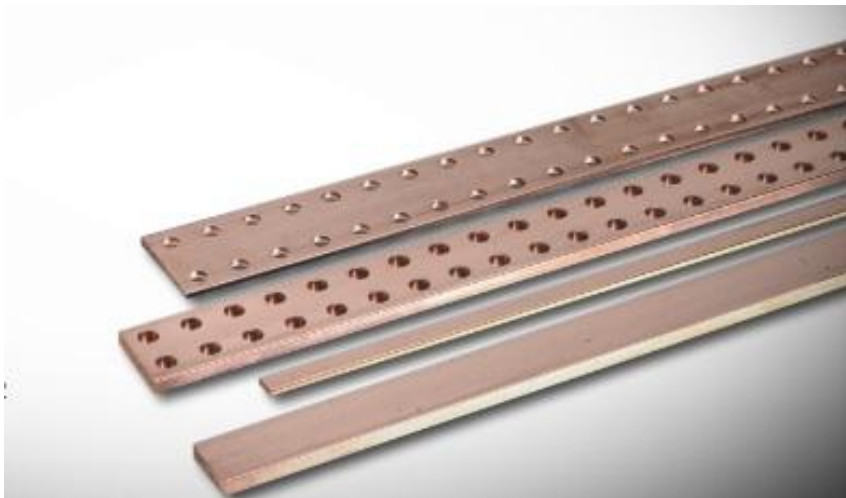
Εικόνα 5.54 : ζυγός διανομής. [24]

4. Ζυγοί διανομής(*Eriflex flexibar and braids*). Σε διαφορετικό σχήμα.



Εικόνα 5.55 : Ζυγός διανομής. [24]

5. Χάλκινοι ζυγοί διανομής(*Copper busbar*). Κατασκευάζονται από χαλκό και είναι σε σπειρωτή μορφή και σε τρυπημένη.



Εικόνα 5.56 : Χάλκινος ζυγός διανομής. [24]

5.10.4 Αντικεραυνική προστασία και σύστημα γείωσης της βάσης. [24]

Στην εικόνα 5.46 παρατηρούμε τη βάση μέσα στη γη καθώς και την αντικεραυνική προστασία με το σύστημα γείωσης.



Εικόνα 5.57 : Βάση μέσα στη γη. [24]

1. Εξωθερμικές συγκολλημένες συνδέσεις (*Exothermically welded connections*). Το πλεονέκτημα αυτών των μοριακών CADWELD συνδέσεων είναι ότι έχουν αγωγιμότητα ίδια με αυτή των αγωγών και αυτή η ιδιότητά τους παραμένει με την πάροδο των χρόνων.



Εικόνα 5.58 : Εξωθερμικές συγκολλημένες συνδέσεις.[24]

2. Μηχανικοί συνδετήρες(Mechanical connections). Ανθεκτικοί σφιγκτήρες με δύο σημεία σύνδεσης που προσαρμόζονται στο σύστημα θεμελιακής γείωσης.



Εικόνα 5.59 : Μηχανικοί συνδετήρες(Mechanical connections).[24]

3. Μπουλόνια σύνδεσης(Bolt couplers). Χρησιμοποιούνται για να συνδεθεί η βάση του πύργου με τα θεμέλια της βάσης του σκυροδέματος.



Εικόνα 5.60 : Μπουλόνια σύνδεσης(Bolt couplers).[24]

4. *Συσκευές ελέγχου(Testers)*. Συσκευές ελέγχου με τις οποίες προσδιορίζεται η ειδική αντίσταση του εδάφους. Γίνονται μετρήσεις πριν αλλά και μετά από την εγκατάσταση της βάσης.



Εικόνα 5.61 : Συσκευές ελέγχου(Testers).[24]

5. *(Lenton lock)*. Χρησιμοποιείται για σύνδεση μεταξύ κυρτών αγωγών και είναι πολύ εύκολο στην τοποθέτηση του.



Εικόνα 5.62 : (Lenton lock).[24]

6. *Lenton terminator*. Χρησιμοποιείται σαν τελείωμα του ενισχυμένου χάλυβα και δένεται μαζί με το σκυρόδεμα.



Εικόνα 5.63 : *Lenton terminator*. [24]

7. *Standard couplers and position couplers*. Χρησιμοποιούνται για την ένωση ράβδων ίδιας διαμέτρου και υπάρχει η δυνατότητα περιστροφής της μίας.



Εικόνα 5.64 : *Standard couplers and position couplers*. [24]

8. *Plastic rebar chairs*. Χρησιμοποιούνται για τη στήριξη των ράβδων μέσα στο σκυρόδεμα.



Εικόνα 5.65 : *Plastic rebar chairs*. [24]

9. Ηλεκτρόδια γείωσης(*Ground rods*). Έχουν μεγάλη ανθεκτικότητα στη διάβρωση και παρέχουν 30 χρόνια τουλάχιστον ζωής υπηρεσιών στα περισσότερα εδάφη.



Εικόνα 5.66 : Ηλεκτρόδια γείωσης(*Ground rods*).[24]

10. Ενισχυμένο υλικό γείωσης(*Ground Enhancement Material*). Είναι ένας χαμηλής αντίστασης άνθρακας σκυροδέματος που βελτιώνει την αποτελεσματικότητα της γείωσης σε περιοχές με χαμηλή αγωγιμότητα.



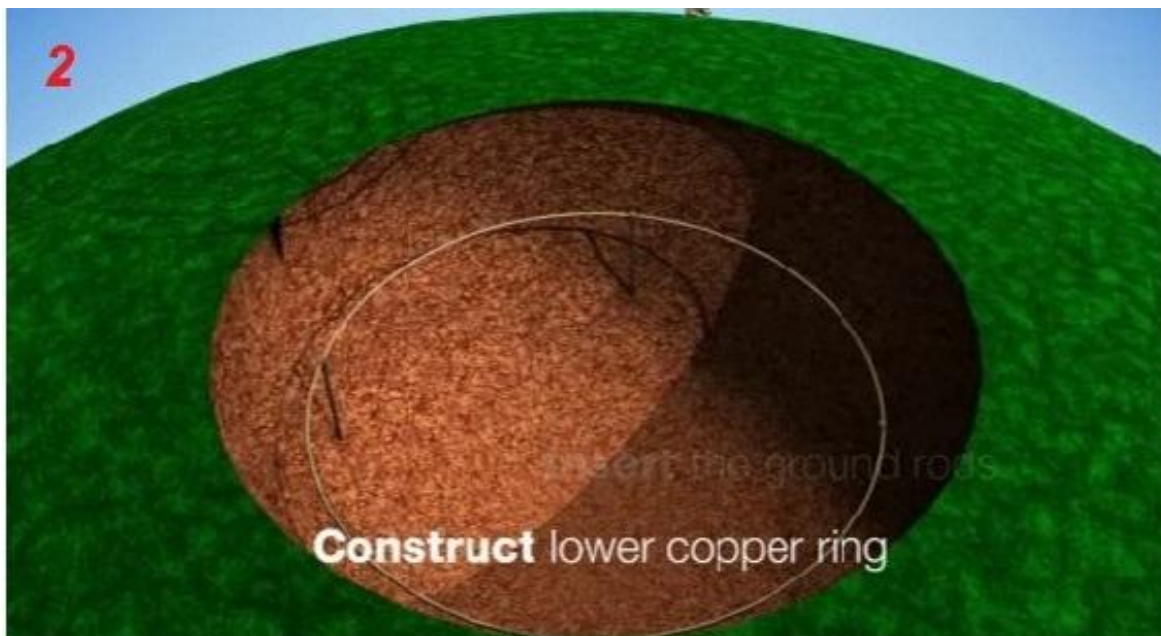
Εικόνα 5.67 : Ηλεκτρόδια γείωσης(*Ground rods*).[24]

5.10.5 Αναπαράσταση κατασκευής της βάσης και του συστήματος γείωσης. [24]

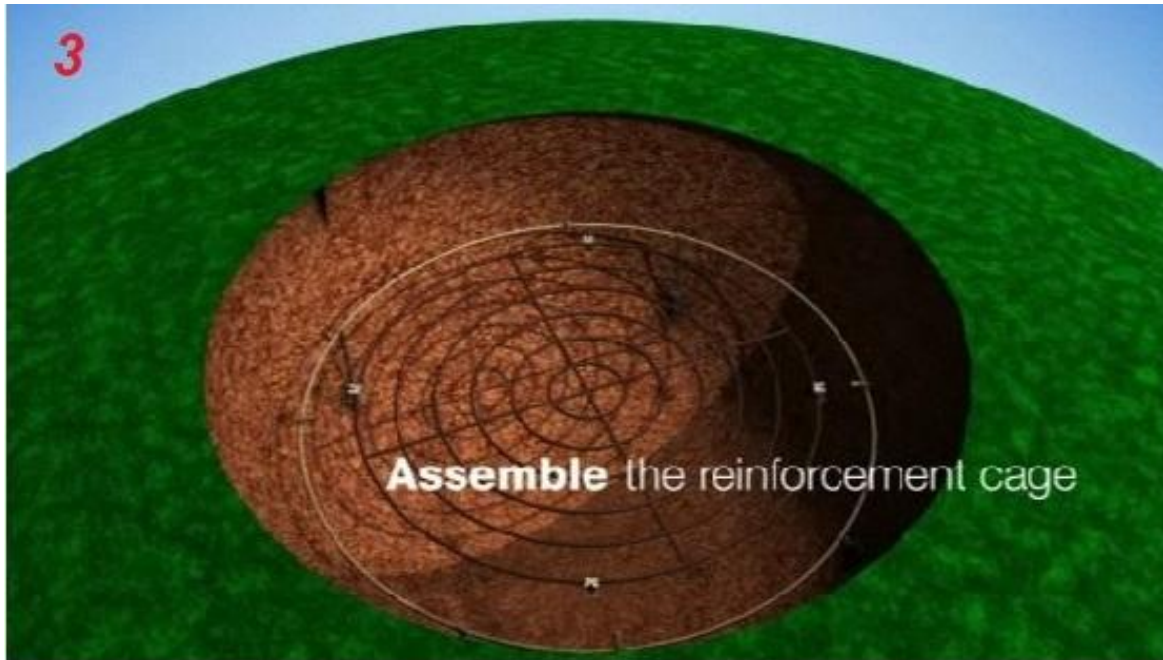
Στις εικόνες που θα ακολουθήσουν φαίνεται με τη σειρά τα βήματα για την κατασκευή της βάσης.



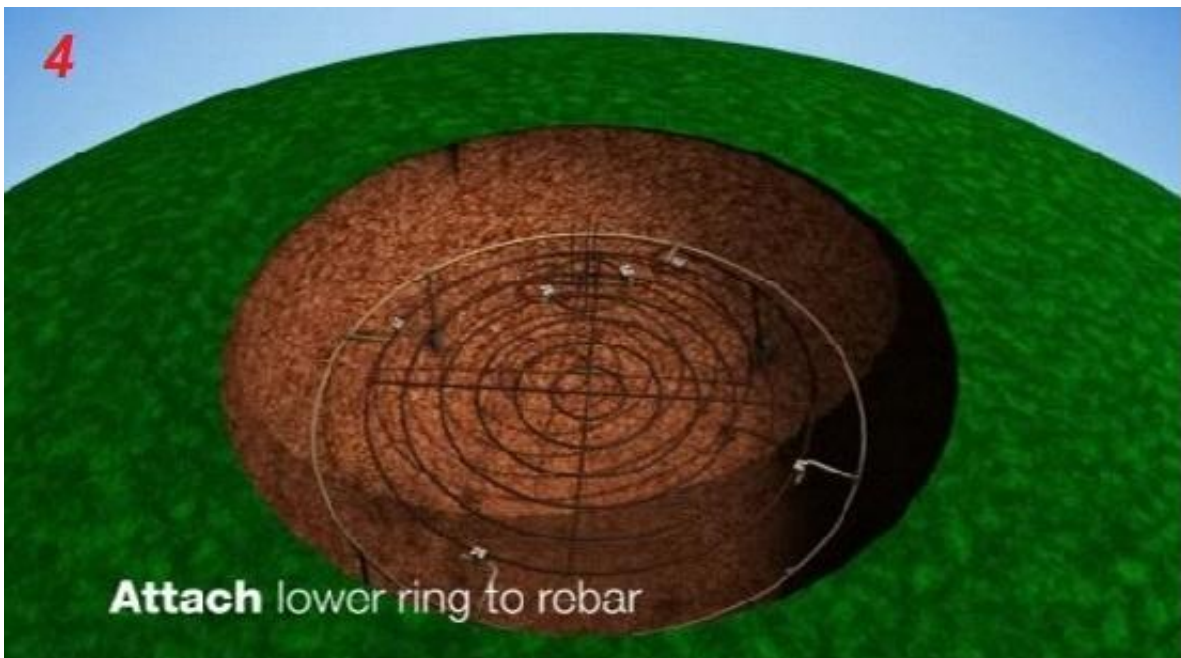
Εικόνα 5.68 : Εγκατάσταση ηλεκτροδίων γείωσης.[24]



Εικόνα 5.69 : Εγκατάσταση κατώτερου χάλκινου δακτυλίου.[24]



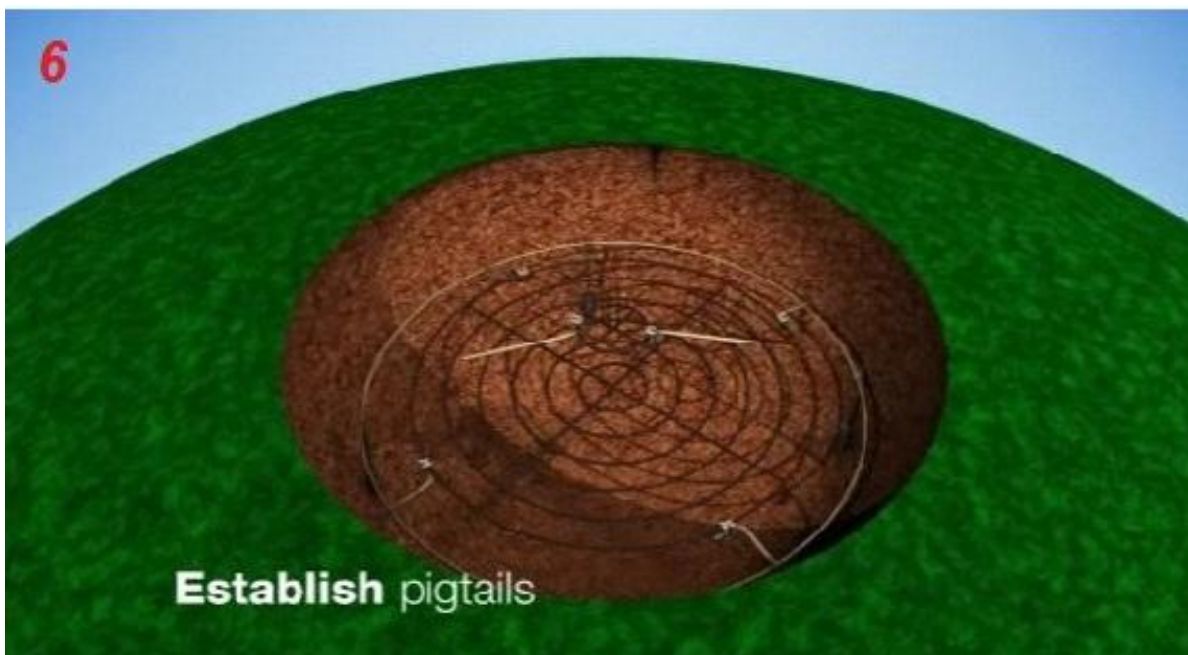
Εικόνα 5.70 : Συναρμολόγηση ενισχυμένου κλωβού.[24]



Εικόνα 5.71 : Σύνδεση κατώτερου δακτυλίου.[24]



Εικόνα 5.72 : Σύνδεση σφιγκτήρα.[24]

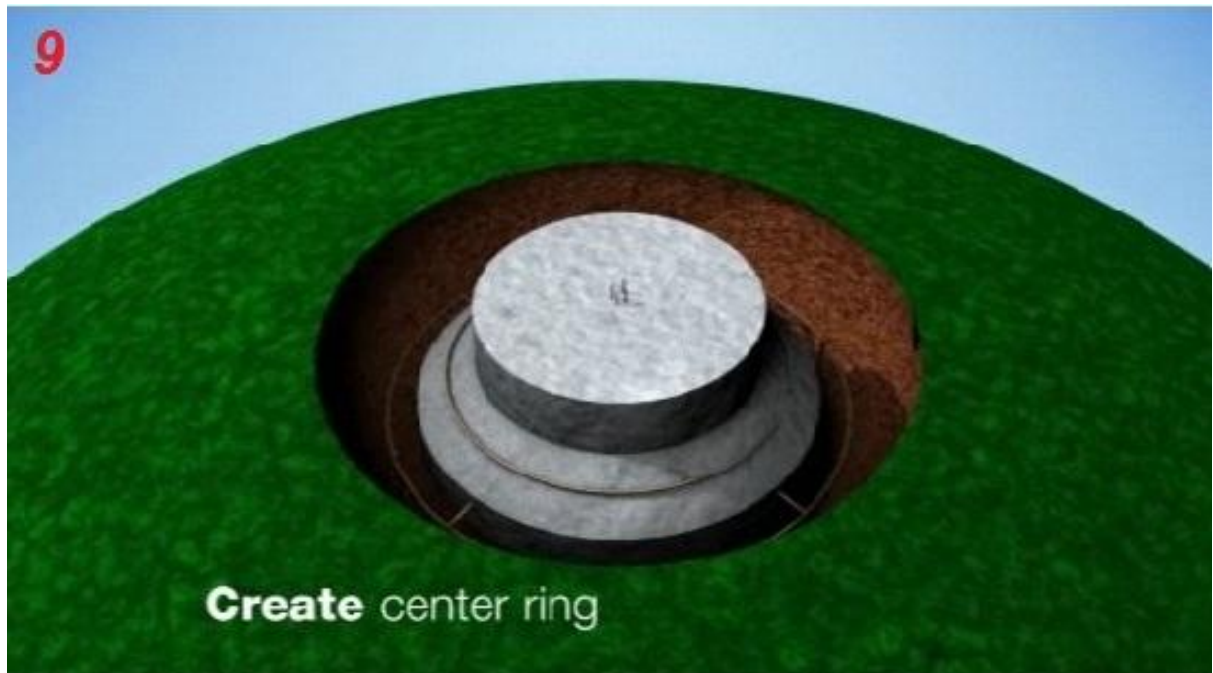




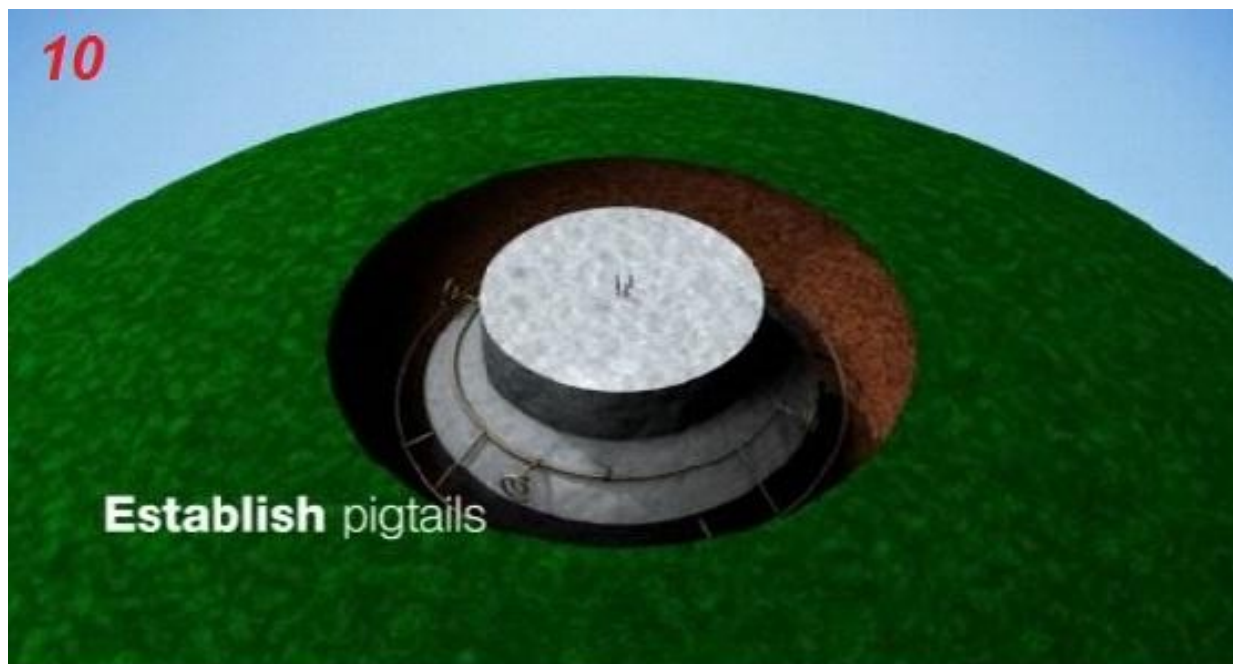
Εικόνα 5.73 : Εγκατάσταση πλεξίδων.[24]



Εικόνα 5.74 : Έγχυση σκυροδέματος.[24]



Εικόνα 5.75: Δημιουργία κεντρικού δακτυλίου.[24]



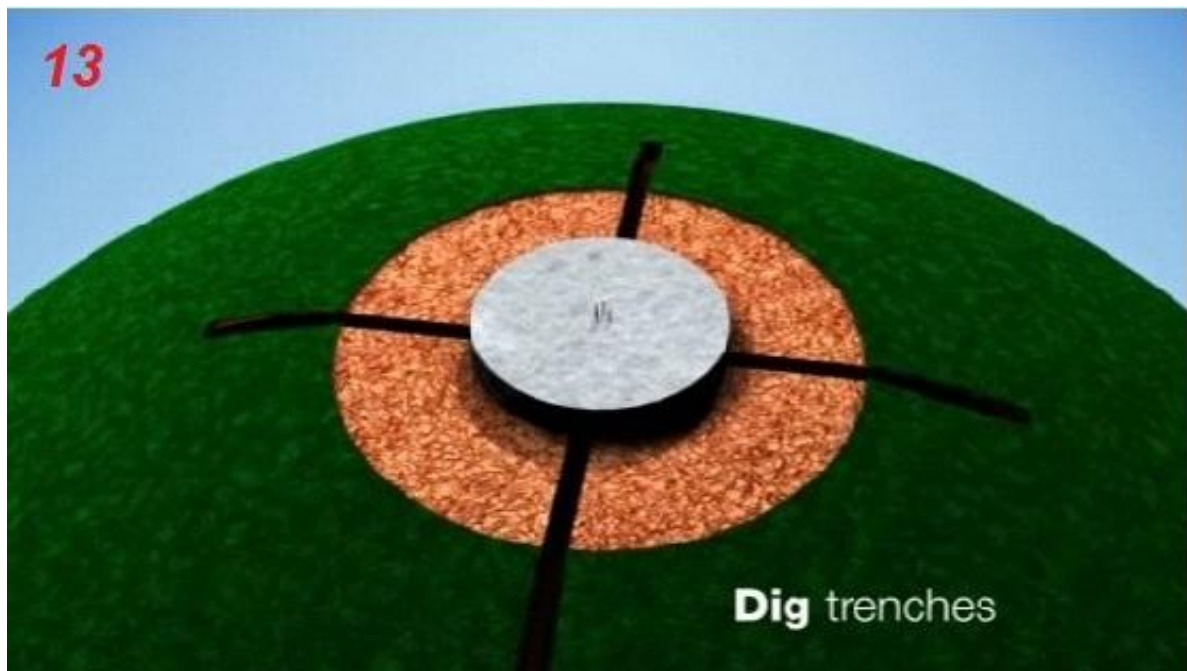
Εικόνα 5.76 : Εγκατάσταση πλεξίδων.[24]



Εικόνα 5.77 : Σύνδεση χάλκινων δακτυλίων και πλεξίδων.[24]



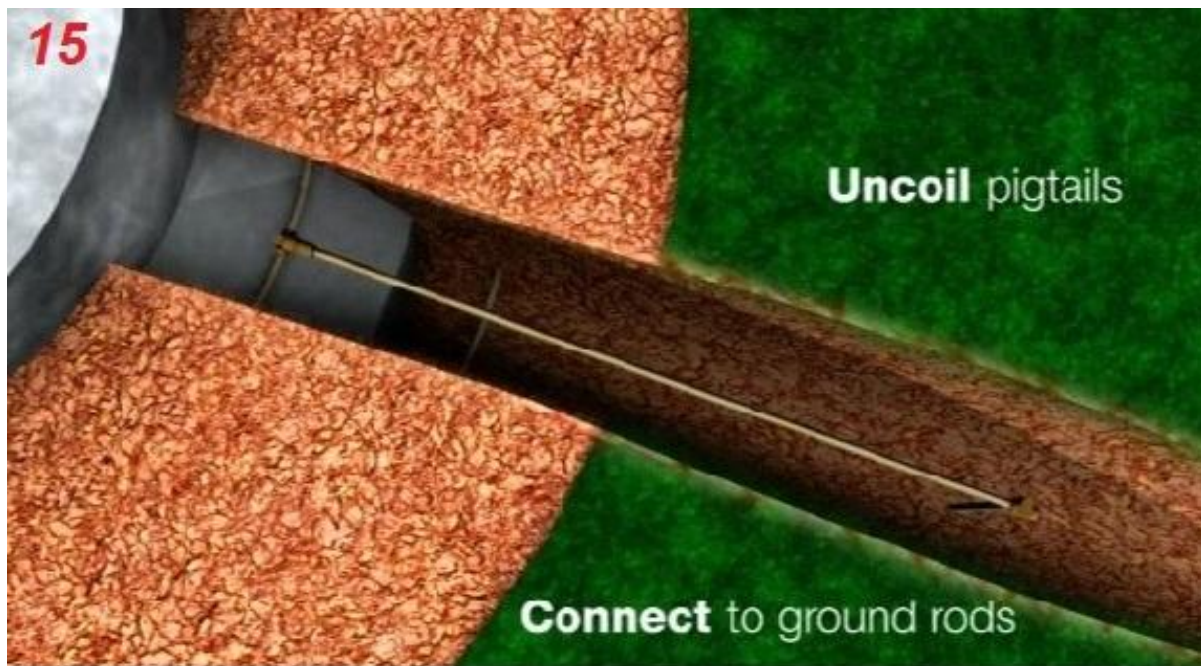
Εικόνα 5.78 : Γέμισμα με χώμα.[24]



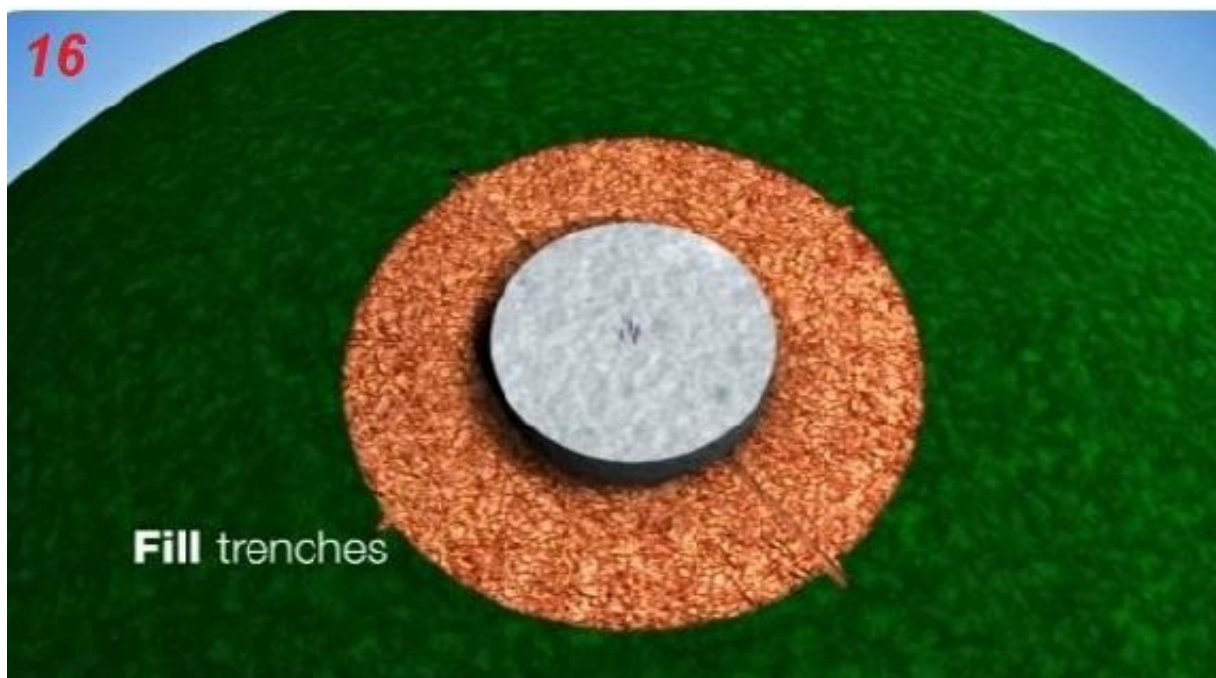
Εικόνα 5.79 : Άνοιγμα χαρακωμάτων. [24]



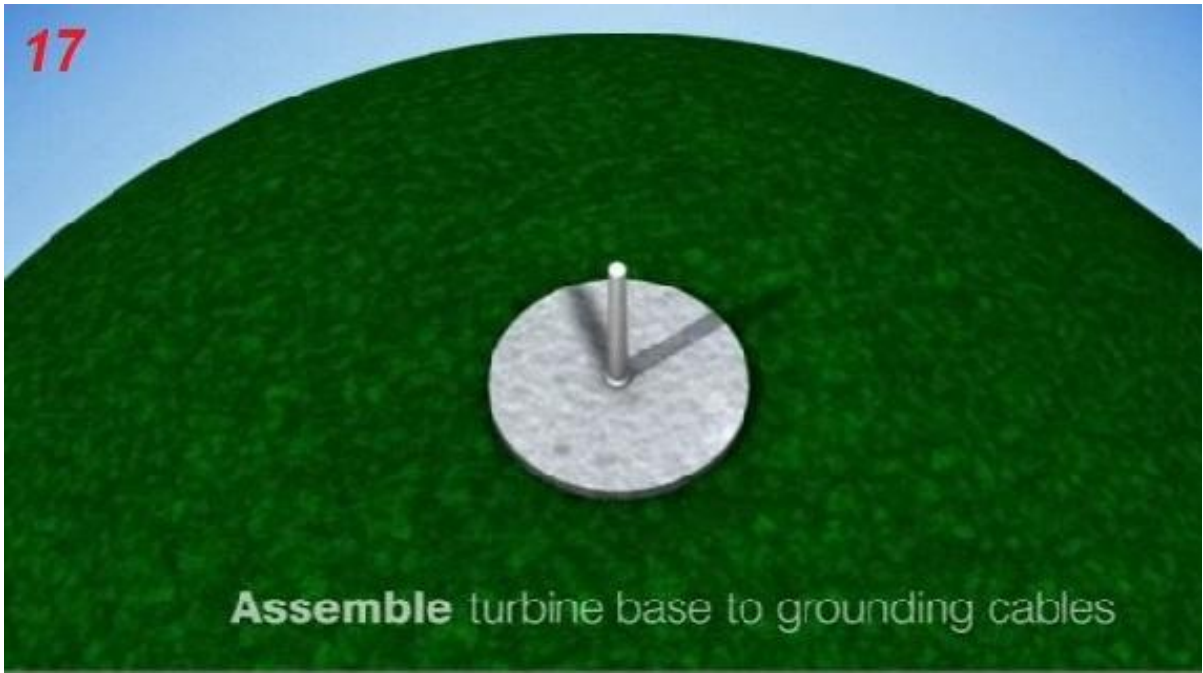
Εικόνα 5.80 : Ξετύλιγμα πλεξίδων. [24]



Εικόνα 5.81 : Σύνδεση πλεξίδων με τα ηλεκτρόδια γείωσης.[24]



Εικόνα 5.82 : Γέμισμα χαρακωμάτων.[24]



Εικόνα 5.83 : Προσαρμογή βάσης ανεμογεννήτριας στα καλώδια γείωσης. [24]

Αναφορές 5^{ου} κεφαλαίου :

1. IEC 61400-24, Wind Turbine Generator Systems – Part 24: Lightning Protection.
2. Ian Coton, Nick Jenkins, Nikos Hatziaargyriou, Maria Lorentzou, Stephen Haigh, Mark Hancock, “Lighting protection of wind turbines”, UMIST, Manchester, UK, First Edition, February 1999
3. Σπυρίδωνος Α. Φωτίου, “Μοντελοποίηση ενός καναλιού εκκενώσεων και η ηλεκτρική του επίδραση στο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας ενός πτερυγίου ανεμογεννήτριας”, Διπλωματική Εργασία, 2006
4. Internet, www.rotortechnik.at
5. R.Iwashita, N.Vasa, S.Yokoyama, “The Effect of Lightning Tower Built for Lightning Attraction Separately from Wind Turbine”, Proceedings of European Wind Energy Association (EWEC) 2006, Athens, Greece, 27 February – 2 March 2006, BL3.425
6. Pastromas S., Pyrgioti E. and Agoris D., “An application of an integrated lightning protection system for wind turbines”, 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Φοιτητών ΗΜΜΥ, ΕΜΠ, 2007, paper 21
7. Wind energy department laboratory for wind turbine testing, Pikermi Attiki
8. College of engineering and technology southern illinois university carbonable
9. IEC 61400-24, Wind Tyrbine Generator (lightning protection)
10. Lightning protection of wind turbines (Google.gr)
11. Μοντελοποίηση ενός καναλιού εκκενώσεων και η ηλεκτρική του επίδραση στο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας ενός πτερυγίου ανεμογεννήτριας – Διπλωματική εργασία (Σπυρίδωνος Φωτίου)
12. IEC 62305 "Protection against lightning"
13. Lightning protection of wind turbines "IET POWER AND ENERGY SERIES 58"
14. IEC 61819
15. Internet, www.rotortechnik.at
16. Earth and lightning protection system for ENERCON WEC's "W.Fellensiek, A.Bohm
17. Internet, http://www.mhi.co.jp/products/pdf/wind_sonota_0610_01b.pdf
18. Internet, http://www.hsa.ei.tum.de/Publikationen/2007/006_2007_Windpower_conductive_coating.pdf
19. Internet, <http://sfhmmv.ntua.gr/2007/papers/paper21.pdf>

20. Internet, http://www.dehn.de/pdf/blitzplaner/BBP_2007_E_complete.pdf
21. Internet, <http://www.aegfinland.fi/pdf/teollisuus/Sahkoverkon%20suojat.pdf>
22. Internet, http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19840002593_1984002593.pdf
23. Internet, <http://www.cholarisk.com/uploads/Breakdown%20Risks%20in%20Windmills%20-%20Final.pdf>
24. Internet, www.erico.com .