

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

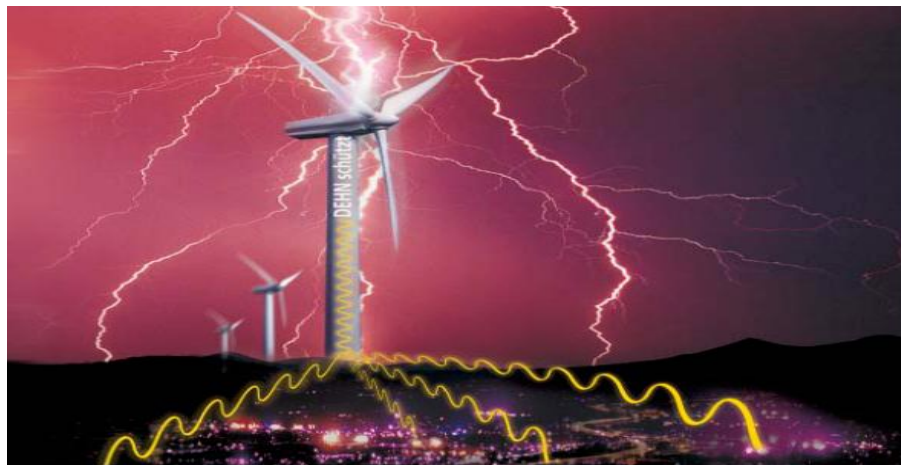
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΡΙΘΜΟΣ 1161

# <<ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΓΙΑ ΠΛΗΓΜΑΤΑ ΚΕΡΑΥΝΩΝ

## ΣΤΑ ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ >>



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

ΒΟΓΙΑΤΖΟΓΛΟΥ ΕΛΕΝΗ

ΕΠΟΠΤΗΣ:

Ε. ΠΥΡΓΙΩΤΗ

ΠΑΤΡΑ ΜΑΙΟΣ 2011

## **ΠΡΟΛΟΓΟΣ:**

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία θα μελετήσουμε πειράματα που πραγματοποιήθηκαν πάνω σε πτερύγια ανεμογεννητριών κατά τα πλήγματα των κεραυνών.

Πλέον οι ανεμογεννήτριες είναι η πιο διαδεδομένη μορφή πηγή ενέργειας. Δυστυχώς όμως τα τεχνικά προβλήματα που δημιουργούνται δεν έχουν λυθεί σε μεγάλο βαθμό και είναι πολύ σημαντικό η προστασία τους από τους κεραυνούς.

Στο πρώτο μέρος αναφερόμαστε στο τι μας προσφέρουν οι ανεμογεννήτριες και ότι τα πλήγματα των κεραυνών είναι αναπόφευκτα. Θα αναφερθούμε επίσης στα προβλεπόμενα μέτρα προστασίας θέλοντας να δείξουμε ότι δεν είναι ικανά να μας δώσουν την πλήρη προστασία που χρειάζεται η ανεμογεννήτρια.

Στο δεύτερο μέρος αναφερόμαστε στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για τα πτερύγια. Θα δούμε ένα από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και τις μετρήσεις που πάρθηκαν. Θα δούμε επίσης τα αποτελέσματα κάθε πειράματος.

Στο τρίτο και τελευταίο μέρος αναφερόμαστε στο που τοποθετούνται οι ανεμογεννήτριες, τα αποτελέσματα μέτρησης των ρευμάτων στις περιοχές αυτές. Στο τελευταίο μέρος θέλουμε να δείξουμε την αποτελεσματικότητα των πειραμάτων.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Ε. Πυργιώτη που μου ανέθεσε αυτή την πτυχιακή εργασία καθώς και για την πολύτιμη καθοδήγηση της σε όλη την διάρκεια αυτής της πτυχιακής.

## ΜΕΡΟΣ Α΄

1	Γενικά .....	6
2	Εισαγωγή .....	7
3	Προστασία ανεμογεννητριών .....	10
3.1	Η προβλεπόμενη προστασία .....	10
3.2	Μέτρα προστασίας .....	11
3.3	Εξωτερικό ΣΑΠ .....	12
3.4	Εσωτερικό ΣΑΠ.....	13

## ΜΕΡΟΣ Β΄

4	Σύστημα προστασίας με πτερύγια φτιαγμένα από σύνθετα υλικά.....	16
4.1	Πτερύγια φτιαγμένα από σύνθετα υλικά (GFRP) .....	16
4.2	Πειραματική διαδικασία .....	17

4.3	Αποτελέσματα και συμπεράσματα του ειράματος.....	20
5	Πειράματα στο πτερύγιο με ένα δέκτη.....	21
5.1	Πτερύγιο με ένα δέκτη .....	21
5.2	Πειραματική Διαδικασία και αποτελέσματα ανά γωνίες .....	21
6	Πειράματα στο πτερύγιο με ένα αγώγιμο κάλυμμα.....	26
6.1	Πτερύγιο με ένα αγώγιμο κάλυμμα.....	26
6.2	Επικάλυψη με χρώμα στο πτερύγιο.....	29
6.3	Πειραματική διαδικασία.....	30
6.4	Μέτρηση Τάσης των σπινθήρων .....	32
6.5	Πειραματικά αποτελέσματα σε FRP-πτερύγια .....	34
7	Παρατήρηση της περιοχής τοποθέτησης μιας ανεμογεννήτριας .....	38
7.1	Περιοχή τοποθέτησης ανεμογεννήτριας .....	38
7.2	Ρύθμιση των μονάδων μέτρησης .....	39
7.3	Οπτικά αποτελέσματα.....	40
7.4	Αποτελέσματα μέτρησης ρεύματος .....	41

## **ΜΕΡΟΣ Γ΄**

<b>Συμπεράσματα από τα αποτελέσματα των πειραμάτων που έγιναν.....</b>	<b>42</b>
<b>Επίλογος .....</b>	<b>44</b>
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>48</b>

## ΜΕΡΟΣ Α΄

### 1.ΓΕΝΙΚΑ

Μία από τις πλέον διαδεδομένες εναλλακτικές μορφές ενέργειας παγκοσμίως είναι η αιολική ενέργεια.

Ο άνεμος αποτελεί μια ανεξάντλητη, φυσική και καθαρή πηγή ενέργειας. Η ηλεκτρική δύναμη που κερδίζεται από τον αέρα έχει γίνει μια καλή καθιερωμένη τεχνική εναλλακτικής παραγωγής ενέργειας παγκοσμίως.

Η αιολική ενέργεια είναι μια από τις παλαιότερες μορφές φυσικής ενέργειας, που αξιοποιήθηκε από πολύ νωρίς για την παραγωγή μηχανικού έργου και έπαιξε αποφασιστικό ρόλο στην εξέλιξη της ανθρωπότητας. Είναι μια ήπια μορφή ενέργειας, φιλική προς το περιβάλλον, πρακτικά ανεξάντλητη, γι' αυτό και είναι ανανεώσιμη.

Τα σύγχρονα συστήματα εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας αφορούν κυρίως μηχανές που μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια και ονομάζονται «**ανεμογεννήτριες**».

Η ανεμογεννήτριες είναι εγκαταστημένες στον κόσμο επειδή παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μόνο με τη δύναμη του αέρα, που σημαίνει ότι είναι πολύ φιλικές προς το περιβάλλον γεννήτριες.



**ΕΙΚΟΝΑ 1: ανεμογεννήτρια**

Η σημαντικότερη οικονομικά εφαρμογή των ανεμογεννητριών είναι η σύνδεσή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο μιας χώρας. Στην περίπτωση αυτή, ένα αιολικό πάρκο, δηλαδή μία συστοιχία πολλών ανεμογεννητριών, εγκαθίσταται και λειτουργεί σε μία περιοχή με υψηλό αιολικό δυναμικό και διοχετεύει το σύνολο της παραγωγής του στο ηλεκτρικό σύστημα.

## **2.ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Παρά τη μακροχρόνια εμπειρία που έχει αποκτηθεί πάνω στα αιολικά πάρκα και γενικά στις ανεμογεννήτριες, τεχνικά προβλήματα δεν έχουν βρει ακόμα τη λύση τους σε ικανοποιητικό βαθμό, το σημαντικότερο από τα οποία είναι η προστασία τους από κεραυνούς, επιβαρύνοντας σημαντικά το λειτουργικό τους κόστος.

Η ηλεκτρική εκκένωση μεταξύ νέφους και γης λέγεται **κεραυνός**.

Ο κεραυνός αποτελεί ένα άστατο, τυχαίο και απρόβλεπτο φαινόμενο. Τα αποτελέσματα των κεραυνών μπορεί να είναι άμεσα ή έμμεσα. Τα άμεσα

αποτελέσματα προέρχονται από θερμότητα που οφείλεται στην αντίσταση (ωμική), στο ηλεκτρικό τόξο και στο αποτέλεσμα καύσης.

Η «πρόβλεψη» των κεραυνών φαίνεται (με την απόλυτη έννοια) να είναι αδύνατη. Ο περιορισμός των συνεπειών τους μπορεί να εξασφαλιστεί με αυξημένα ποσοστά ασφάλειας με τη χρήση συστηματικών κατασκευών προστασίας.



## **ΕΙΚΟΝΑ 2: Φωτογραφία από κεραυνό που χτυπάει ανεμογεννήτρια**

Η προστασία των ανεμογεννητριών από τους κεραυνούς αποτελεί μια από τις σημαντικότερες προϋποθέσεις για τη λειτουργία τους. Για τη μεγαλύτερη λειτουργική απόδοση των ανεμογεννητριών (Α/Γ), παράκτιες και ορεινές περιοχές επιλέγονται για την εγκατάστασή τους οι οποίες όμως είναι από τις πλέον εκτεθειμένες τοποθεσίες από πλήγματα κεραυνών. Ο κίνδυνος για τις κατασκευές που χτυπιούνται από κεραυνούς αυξάνεται σε σχέση με το συνολικό ύψος μιας κατασκευής.





### **ΕΙΚΟΝΑ 3: τοποθεσία εκτεθειμένη στους κεραυνούς**

Οι ανεμογεννήτριες σχεδιάζονται με μια σειρά από διαφορετικά υλικά και κατασκευές συνδυάζοντας την σύνθετη μόνωση, την αγωγιμότητα, το ξύλο, τον έλεγχο και τα συστήματα ελέγχου κ.λπ. Ανάλογα με το συγκεκριμένο σχέδιο ανεμογεννητριών κάθε κατασκευαστής χρησιμοποιεί ξεχωριστά μέτρα προστασίας για τους κεραυνούς.

Η έκταση των καταστροφών από ένα πλήγμα κεραυνού, δηλαδή ζημιές που προκαλούνται τον χειμώνα σε ανεμογεννήτριες στην Ιαπωνία αναφέρεται να είναι μεγαλύτερες από αυτές των άλλων ευρωπαϊκών χωρών.

Η ακτή της θάλασσας της Ιαπωνίας θεωρείται μια από τις καταλληλότερες περιοχές για την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών, εντούτοις, κεραυνοί εμφανίζονται συχνά των χειμώνα.



**ΕΙΚΟΝΑ 4: κεραυνόπληκτη περιοχή της Ιαπωνίας**

Τέτοιες ζημιές από κεραυνούς στις ανεμογεννήτριες είναι ένα αρκετό σοβαρό ζήτημα δεδομένου ότι το κόστος για την αντικατάσταση των εξαρτημάτων που καταστράφηκαν είναι εντυπωσιακά υψηλό όπως και ο χρόνος επισκευής τους αρκετός.

Έτσι παρατίθενται κάποια στοιχεία υστέρα από πειραματικές μελέτες που έγιναν για διάφορα συστήματα προστασίας στην παράκτια περιοχή της Ιαπωνίας διότι οι περιοχές της παραλίας της Ιαπωνίας έχουν άφθονες πηγές του αέρα για την παραγωγή ενέργειας. Έτσι, πολλές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας έχουν κατασκευαστεί και τοποθετηθεί εκεί.

### **3.ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ**

#### **3.1 Η προβλεπόμενη προστασία**



**ΕΙΚΟΝΑ 5: Φωτογραφία σε περιοχή με αστραπές**

Προκειμένου να αποφανθούμε εάν απαιτείται η εγκατάσταση ενός Συστήματος Αντικεραυνικής Προστασίας (ΣΑΠ) σε μια κατασκευή και εάν απαιτείται σε ποια Στάθμη Προστασίας θα πρέπει να εντάξουμε τον σχεδιασμό της, θα πρέπει να συμβουλευθούμε το Πρότυπο ΕΛΟΤ 1412.

Στο συγκεκριμένο Πρότυπο δίδοντας δεδομένα όπως, την χρήση της κατασκευής, τις διαστάσεις της, την γεωγραφική της θέση κλπ. και λαμβάνοντας διάφορες παραμέτρους βαρύτητας από αντίστοιχους πίνακες, εξάγεται κάποιο αποτέλεσμα με την βοήθεια του οποίου τεκμηριώνεται η τελική απόφαση.

### **3.2 Μέτρα προστασίας**

Η κύρια ανησυχία σε αυτήν την συμβολή στην τεχνολογία είναι η πραγματοποίηση των μέτρων προστασίας από τους κεραυνούς και δυναμικά μέτρα για την απότομη άνοδο της τάσης ώστε να προστατεύονται τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα των ανεμογεννητριών.

Αφού έχουμε κατατάξει την υποψήφια κατασκευή σε κάποια εκ των Σταθμών Προστασίας ξεκινώντας από την πιο αυστηρή ( I ), προβαίνουμε στον σχεδιασμό και

στην υλοποίηση της εγκατάστασης του ΣΑΠ σύμφωνα με το ΕΛΟΤ 1197 ή το Ευρωπαϊκό ENV61024-1. Σύμφωνα με το παραπάνω Πρότυπο το ΣΑΠ, αποτελείται από το Εξωτερικό ΣΑΠ και το Εσωτερικό ΣΑΠ.

### **3.3 ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΣΑΠ**

Το Εξωτερικό ΣΑΠ αποτελείται από το Συλλεκτήριο Σύστημα, τους αγωγούς Καθόδου και το Σύστημα Γείωσης.

#### **a. ΣΥΛΛΕΚΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑ**

Το Συλλεκτήριο σύστημα σκοπό έχει να συλλέξει το ρεύμα του κεραυνού και να το διοχετεύσει μέσω των αγωγών καθόδου στο σύστημα γείωσης με ασφάλεια.

Μπορεί να σχεδιασθεί ανεξάρτητα ή σε συνδυασμό σύμφωνα με τις παρακάτω μεθόδους:

- ✓ Γωνία προστασίας
- ✓ Κυλιόμενη σφαίρα
- ✓ Βρόχου

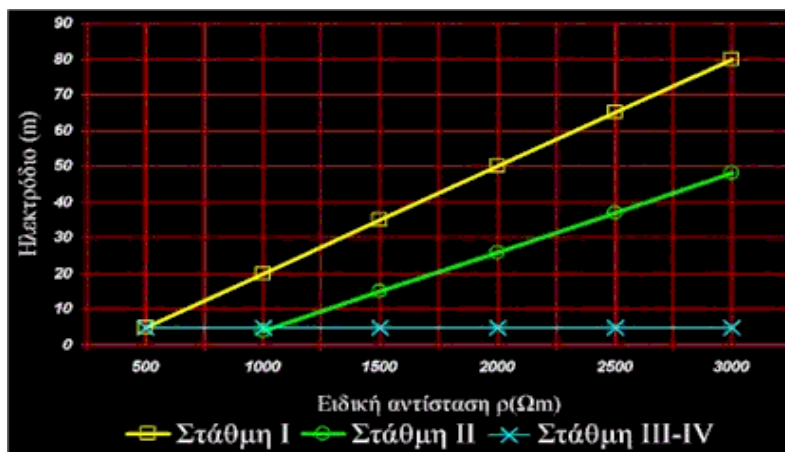
#### **b. ΑΓΩΓΟΙ ΚΑΘΟΔΟΥ**

Οι αγωγοί καθόδου σκοπό έχουν να οδηγήσουν το ρεύμα του κεραυνού από το Συλλεκτήριο, με ασφάλεια στο σύστημα γείωσης.

#### **c. ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΕΙΩΣΗΣ.**

Σκοπός του συστήματος γείωσης είναι να επιτυγχάνει την διάχυση του ρεύματος του κεραυνού μέσα στη γη, με ταχύτητα και ασφάλεια χωρίς να

δημιουργούνται επικίνδυνες υπερτάσεις στον χώρο όπου είναι κατασκευασμένη. Η απαίτηση της τιμής της αντίστασης του συστήματος γείωσης είναι, είτε κάτω από  $10\Omega$ , είτε ένα ελάχιστο μήκος γείωσης όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα που ακολουθεί που είναι ισοδύναμος του Ευρωπαϊκού Προτύπου ENV 61024-1.



**ΣΧΗΜΑ 6:** πίνακας ισοδύναμος του Ευρωπαϊκού Προτύπου

### 3.4 Εσωτερικό ΣΑΠ

Το Εσωτερικό ΣΑΠ σκοπό έχει την μείωση των τάσεων που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια πλήγματος από κεραυνό επί της κατασκευής ή πλησίον αυτής, στις ηλεκτρικά αγωγίμες εγκαταστάσεις της, σε αποδεκτά επίπεδα έτσι ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος ανάπτυξης επικίνδυνων σπινθήρων ή τάσεων επαφής. Η μείωση των τάσεων επιτυγχάνεται με Ισοδυναμικές Συνδέσεις και τους Απαγωγούς Κρουστικών Υπερτάσεων.

#### a. Ισοδυναμικές συνδέσεις.

Σκοπός των ισοδύναμων συνδέσεων είναι να μειώσουν τις διαφορές δυναμικού

μεταξύ των μεταλλικών μερών και εγκαταστάσεων στο εσωτερικό του υπό προστασία χώρου και να μειώσουν το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται κατά την άμεση ή έμμεση κεραυνοπληξία, εντός αυτού.

Ο εσωτερικός χώρος του υπό προστασία χώρου πρέπει να διαιρεθεί σε Ζώνες Αντικεραυνικής Προστασίας (ΖΑΠ) προκειμένου να ορισθούν χώροι διαφορετικής επίδρασης κεραυνικής ηλεκτρομαγνητικής κρούσης σύμφωνα με το IEC 61312-1

Ορισμοί ζωνών	
ΖΑΠ ΟΑ	Ζώνη όπου τα στοιχεία της κατασκευής που ανήκουν στην ζώνη, υπόκεινται σε άμεσα πλήγματα από κεραυνούς, και συνεπώς μπορεί να χρειαστεί να μεταφέρουν το πλήρες ρεύμα του κεραυνού. Σ' αυτή τη ζώνη το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο δεν είναι ασθενές.
ΖΑΠ ΟΒ	Ζώνη όπου τα στοιχεία της κατασκευής που ανήκουν στην ζώνη, δεν υπόκεινται σε άμεσα πλήγματα από κεραυνούς. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο επίσης δεν είναι ασθενές.
ΖΑΠ 1	Ζώνη όπου τα στοιχεία της κατασκευής που ανήκουν στην ζώνη, δεν υπόκεινται σε άμεσα πλήγματα από κεραυνούς και όπου τα ρεύματα σε όλα τα αγώγιμα μέρη που περιλαμβάνονται σε αυτή τη ζώνη είναι πολύ μειωμένα σε σχέση με τα ρεύματα των ζωνών ΟΒ. Σε αυτή τη ζώνη, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μπορεί να είναι ασθενές ανάλογα με τα μέτρα θωράκισης

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΖΩΝΩΝ**

## **b) Απαγωγείς κρουστικών υπερτάσεων – υπερεντάσεων.**

Οι Απαγωγείς Κρουστικών Υπερτάσεων είναι διατάξεις προστασίας Ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών έναντι κρουστικών υπερτάσεων οι οποίες μειώνουν τις υπερτάσεις αυτές που δημιουργούνται από φυσικές ή τεχνητές πηγές, όπως κεραυνοί, ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, χειρισμοί διακοπών και βραχυκυκλωμάτων, σε ασφαλή επίπεδα.

## **ΜΕΡΟΣ Β΄**

### **4.ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΜΕ ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΦΤΙΑΓΜΕΝΑ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ (GFRP)**

#### **4.1 ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΦΤΙΑΓΜΕΝΑ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ (GFRP)**

##### **ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ**

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες αποτελούνται από τα κοίλα πτερύγια φτιαγμένα από σύνθετα υλικά, όπως ίνες γυαλιού ενισχυμένες με πλαστικό υλικό (GFRP) (Glass Fiber Reinforced Plastic) (γυαλί ενισχυμένο με ίνες πλαστικού). Στην Ευρώπη και σε πολλές άλλες χώρες, διάφορα είδη συστημάτων προστασίας από κεραυνούς αποτελούνται από σημεία επαφής (δέκτες) και τους αγωγούς καθόδου ώστε το ρεύμα να ρέει στην γη ακίνδυνα.

Πτερύγια που είναι τοποθετημένα με ένα τέτοιο σύστημα προστασίας δηλαδή με GFRP, χωρίς κανένα οποιοδήποτε άλλο πρόσθετο σύστημα προστασίας δεν είχε σημαντικά αποτελέσματα αλλά είναι γεγονός ότι σε περίπτωση πλήγματος από κεραυνό στα πτερύγια που είναι φτιαγμένα από μη αγωγιμα υλικά οι ζημιές αναμένονται να είναι μικρές.

Εντούτοις, αυτή η μέθοδος προστασίας μεταβιβάζει την ηλεκτρική ενέργεια από το έδαφος στην κορυφή του πτερυγίου, ως αποτελέσματα όταν μια ανεμοθύελλα έρχεται, το ηλεκτρικό πεδίο να είναι συγκεντρωμένο στην κορυφή του πτερυγίου με

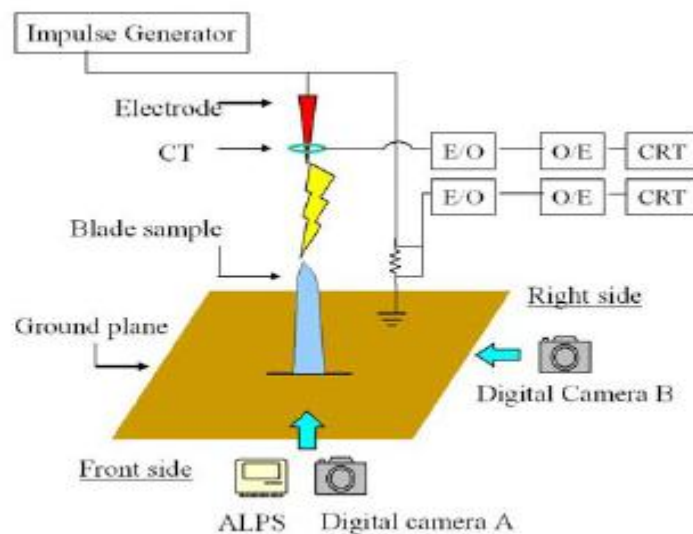


αποτέλεσμα να αυξάνεται η πιθανότητα ο κεραυνός να χτυπήσει την ανεμογεννήτρια.

## 4.2 Πειραματική διαδικασία

Στο παρακάτω πείραμα ερευνήθηκε η συμπεριφορά και η επαφή της εκκένωσης του κεραυνού στα περύγια των ανεμογεννητριών χρησιμοποιώντας μια γεννήτρια κρουστικής τάσης 12MV .

Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται η πειραματική εγκατάσταση των παρατηρητικών εξοπλισμών.



Σχήμα 1: Πειραματική εγκατάσταση του εξοπλισμού

Από την μια εφαρμόστηκε τάση στο ηλεκτρόδιο και από την άλλη είχαμε αλλαγή πολικότητας της τάσης με αποτέλεσμα να εμφανιστούν σπινθήρες και στις δυο

περιπτώσεις όπου καταγράφηκαν από δύο ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές από διαφορετικές κατευθύνσεις ταυτόχρονα.

Ο σπινθήρας στην περίπτωση της τάσης διαδίδεται γραμμικά μεταξύ των κενών από το ηλεκτρόδιο στο έδαφος, ενώ από την άλλη ο σπινθήρας στην περίπτωση της αλλαγής της πολικότητας διαδίδεται τυχαία.

Ένα αυτόματο σύστημα παρατήρησης του κεραυνού ALPS (υγρή κρυσταλλική φωτογραφική μηχανή με ίνες συνδεδεμένη με φωτοδίοδο) χρησιμοποιήθηκε για να ανιχνεύει την παροδική εκπομπή της θερμότητας

Παρακάτω προσπαθήσαμε να επιβεβαιώσουμε την αποτελεσματικότητα του συγκεκριμένου πειράματος παίρνοντας ένα κομμάτι (3m) από αληθινό πτερύγιο φτιαγμένο από GFRP(πείραμα σε μη αγώγιμο πτερύγιο).

Το κομμάτι από το πτερύγιο τοποθετήθηκε κάθετα σε ένα ξύλινο στήριγμα, και έτσι δημιουργήθηκε ένα κενό μεταξύ του ηλεκτροδίου και της άκρης του δείγματος του πτερυγίου το οποίο ήταν περίπου 4m.

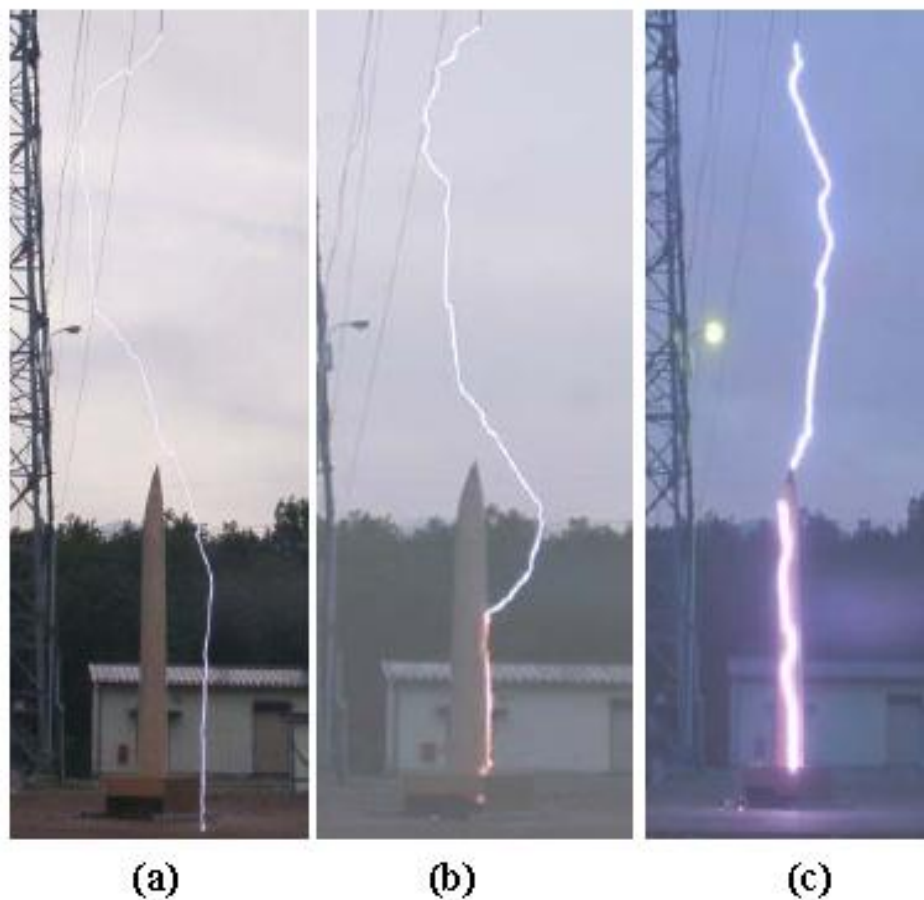
Για να μπορέσουμε να ερευνήσουμε το συγκεκριμένο πείραμα το κομμάτι από το πτερύγιο ψεκάστηκε με νερό το οποίο είχε αναμιχθεί με αλάτι.

Το σχήμα 2 δείχνει την συμπεριφορά των εκκενώσεων στο κομμάτι που πήραμε από το πτερύγιο ενός μη αγώγιμου δείγματος από το πτερύγιο.

Όταν το δείγμα από το πτερύγιο είναι φτιαγμένο από διηλεκτρικά υλικά παρατηρείται συχνά όπως στο σχήμα 2(a) η εκκένωση από το ηλεκτρόδιο στο έδαφος.

Εκκενώσεις από το ηλεκτρόδιο κατά μήκος του πτερυγίου από την μέση μέχρι το

έδαφος παρατηρήθηκε επίσης αρκετές φορές όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2 (b) καθώς το δείγμα δεν ήταν ψεκασμένο με αλατισμένο νερό. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2(c) η εκκένωση από το ηλεκτρόδιο στο έδαφος εμφανίστηκε κατά μήκος όλου του πτερυγίου και ήταν ψεκασμένο με αλατισμένο νερό.



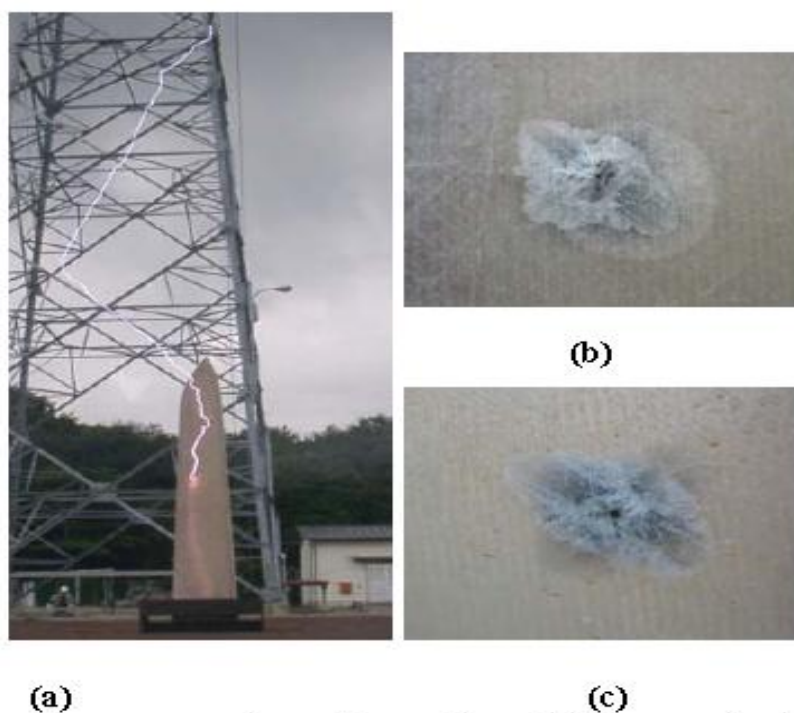
**Σχήμα 2: Συμπεριφορά κεραυνού σε μη αγώγιμο πτερύγιο.(a) Κεραυνός από το ηλεκτρόδιο στο έδαφος.(b) Κίνηση κεραυνού (σε αγώγo χωρίς αλατισμένο νερό).(c) Κίνηση κεραυνού (σε αγώγo με αλατισμένο νερό).**

### 4.3 Αποτελέσματα και συμπεράσματα του περάματος

Εντούτοις, κατά τη διάρκεια του πειράματος, η εκκένωση διαπέρασε το πτερύγιο όπως φαίνεται στο σχήμα 3 και το κατάστρεψε. Το σημείο που καταστράφηκε λόγω της εκκένωσης στο πτερύγιο στην μπροστινή και την πίσω πλευρά του παρουσιάζονται στο σχήμα 3 (b) και (c), αντίστοιχα.

Αυτή η τιμή είναι 100 φορές μικρότερη από την πραγματική τιμή της ενέργειας σε μια πραγματική εκκένωση. Επομένως αν υπάρξει μια τέτοια πραγματική εκκένωση η ζημία θα είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Γενικά, η ιδιότητα της μόνωσης σε μη αγώγιμα υλικά μειώνεται εάν η επιφάνεια του υλικού είναι ψεκασμένη με αλατούχο νερό.



**ΣΧΗΜΑ 3: (a) Συμπεριφορά κεραυνού.(b) Μπροστινή πλευρά. (c) Πίσω πλευρά.**

Αυτό είναι ένα σημαντικό πρόβλημα για τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις όπου περιλαμβάνουν ανεμογεννήτριες κοντά σε θάλασσα. Ειδικότερα, το κόστος για τις αντικαταστάσεις των πτερυγίων είναι υψηλό και επίσης μακροχρόνιας επισκευής. Επομένως, οι ζημιές στα πτερύγια είναι ένα πολύ σοβαρό ζήτημα.

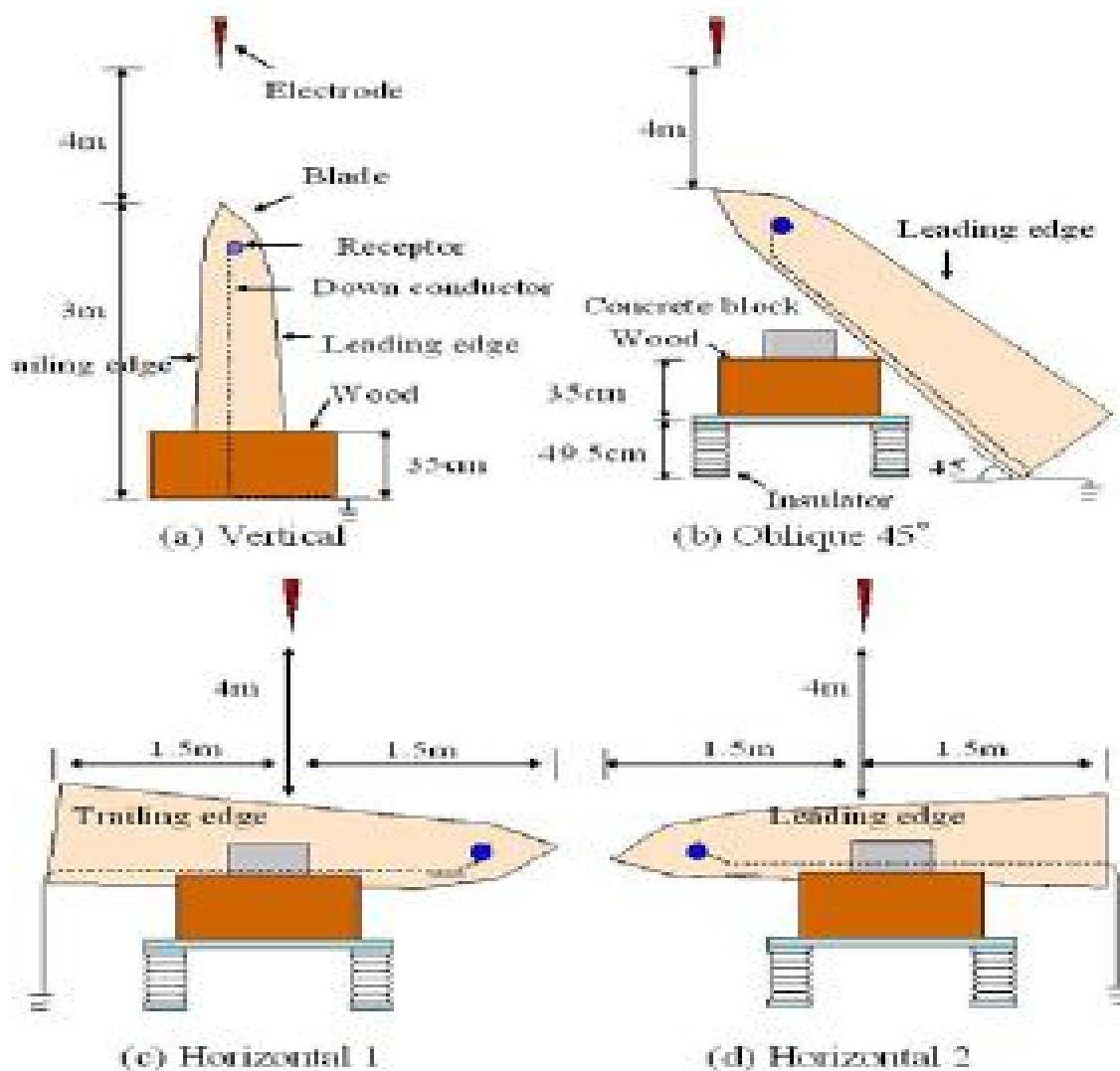
## **5.ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΤΟ ΠΤΕΡΥΓΙΟ ΜΕ ΕΝΑΝ ΔΕΚΤΗ**

### **5.1 Πτερύγιο με έναν δέκτη**

Σε αυτό το πείραμα ερευνήθηκε η επίδραση ενός μικρού μεταλλικού δέκτη ο οποίος ενσωματώθηκε στην άκρη του πτερυγίου. Στο μπροστινό τμήμα του δείγματος του πτερυγίου των 3 m τοποθετήθηκε ένας δέκτης χαλκού με διάμετρο 25 mm. Ο δέκτης τοποθετήθηκε 250 mm από την άκρη του πτερυγίου και 130 mm από τις δύο άκρες. Από τον δέκτη, συνδέθηκε ένας αγωγός καθόδου με το έδαφος μέσα από το εσωτερικό του πτερυγίου.

### **5.2 Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα ανά γωνίες**

Καθώς οι ανεμογεννήτριες στρέφονταν, εκτελέστηκαν τα πειράματα σε τέσσερις διαφορετικές χαρακτηριστικές ρυθμίσεις όπως κάθετα , πλαγίως 45°, οριζοντίως 1 και οριζοντίως 2 όπως φαίνεται στο σχήμα 4 (α) ~ (δ), αντίστοιχα



Σχήμα 4: Πειράματα πάνω στο πτερύγιο με δέκτη.

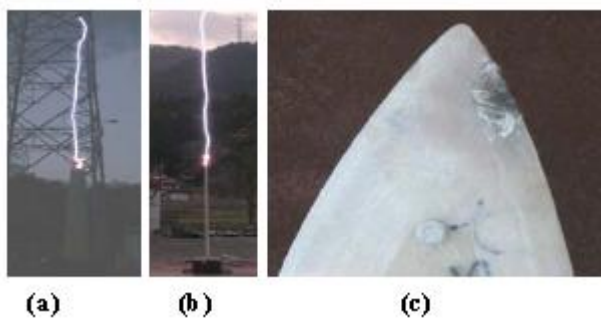
**(α) Κάθετη Ρύθμιση .**

Σε πολλές περιπτώσεις, η εκκένωση εμφανίστηκε κατά μήκος της επιφάνειας του πτερύγιου ακουμπώντας τον δέκτη, μερικές φορές η εκκένωση πέρασε κατευθείαν στο δέκτη μέσω του αέρα. Ο πίνακας 2 παρουσιάζει τα πειραματικά αποτελέσματα στην κάθετη ρύθμιση και φαίνονται διαφορετικές συμπεριφορές εκκένωσης οι οποίες αντιμετωπίστηκαν αναλόγως.

**Πίνακας 2: Πειραματικά αποτελέσματα ενός πτερυγίου με δέκτη σε κάθετη θέση**

κυματομορφή		Συμπεριφορά εκκένωσης	Αριθμός εκκένωσης
L.I	+	Επαφή με το δέκτη	6
	-	Επαφή με το δέκτη	3
		Καταστρεμμένη η άκρη του πτερυγίου	3
S.I	+	Επαφή με το δέκτη	9
		Καταστρεμμένη η άκρη του πτερυγίου	1
	-	Επαφή με το δέκτη	10

Όταν η εκκένωση χτύπησε στην κορυφή του πτερυγίου καθώς πήγαινε προς τον δέκτη, κατάστρεψε την άκρη όπως φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 5.



**Σχήμα 5: Συμπεριφορά κεραυνού σε πρότυπο πτερύγιο σε κάθετη θέση με τον δέκτη. (a) Μπροστινή πλευρά. (b) Σωστή πλευρά. (c) Σημείο ζημιάς.**

### **(β) ρύθμιση πλαγίως 45°**

Αν και τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν 10 φορές κάθε μια με αλλαγή πολικότητας, καμία ζημία δεν προκλήθηκε. Τις περισσότερες φορές που πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε θέση πλαγίως 45° η εκκένωση πήγαινε κατά μήκος της επιφάνειας του πτερυγίου και απλώς ακούμπησε τον δέκτη.

### **(γ) ρύθμιση οριζοντίως 1**

Ο πίνακας 3 παρουσιάζει τα πειραματικά αποτελέσματα σε θέση οριζοντίως 1. Στην περίπτωση της αρνητικής εκκένωσης, ο δέκτης θα μπορούσε επιτυχώς να παρεμποδίσει την εκκένωση πολλές φορές. Εντούτοις στη περίπτωση της θετικής εκκένωσης, η εκκένωση φάνηκε να διαπερνά συχνά στο πίσω μέρος του πτερυγίου περίπου στο μέσο του.

**Πίνακας 3: Πειραματικά αποτελέσματα του πτερυγίου με δέκτη σε ρύθμιση οριζοντίως 1**

κυματομορφή		Συμπεριφορά εκκένωσης	Αριθμός εκκένωσης
L.I	+	Διείσδυση στο πτερύγιο	3
	-	Επαφή με το δέκτη	20
S.I	+	Διείσδυση στο πτερύγιο	12
		Επιφανειακή ζημιά	2
	-	Επαφή με το δέκτη	16
		Διείσδυση στο πτερύγιο	1



Στο σχήμα 6 φαίνεται οι καταστρεμμένες περιοχές και κατεύθυνση που πήρε η εκκένωση κατά την διάρκεια αυτού του πειράματος.



**Σχήμα 6: α) πτερύγιο σε θέση Οριζοντίως 1(μπροστινή όψη),β) δεξιά θέση, γ) καταστρεμμένη περιοχή.**

#### **(δ) Ρύθμιση 2 οριζοντίως**

Ο πίνακας 4 παρουσιάζει τα πειραματικά αποτελέσματα. Ομοίως με τα αποτελέσματα της ρύθμισης οριζοντίως 1, έχουμε ότι η εκκένωση όταν εφαρμόσαμε θετική τάση κατέστρεψε το πτερύγιο πολλές φορές ενώ στην περίπτωση της εκκένωσης με αρνητική τάση απλώς ακούμπησε τον δέκτη επιφανειακά πολλές φορές. Αυτά τα αποτελέσματα αποδίδονται στο γεγονός ότι όταν εφαρμόζεται μια αρνητική τάση ώθησης στο ηλεκτρόδιο, οι σπινθήρες τείνουν να προχωρήσουν προς

το συγκεκριμένο αντικείμενο δηλαδή τον δέκτη. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πειράματος, η εκκένωση L.I (lightning impulse) ήταν πιο καταστρεπτική σε σχέση με την εκκένωση με αλλαγή πολικότητας S.I (Switching impulse). Καθώς το μπροστινό μέρος της κορυφής του πτερυγίου ερχόταν αντιμέτωπο με το ηλεκτρόδιο, η συχνότητα της καταστροφής ήταν πιο μικρή συγκρίνοντας την με τα αποτελέσματα του πειράματος ρύθμισης οριζοντίως 1.

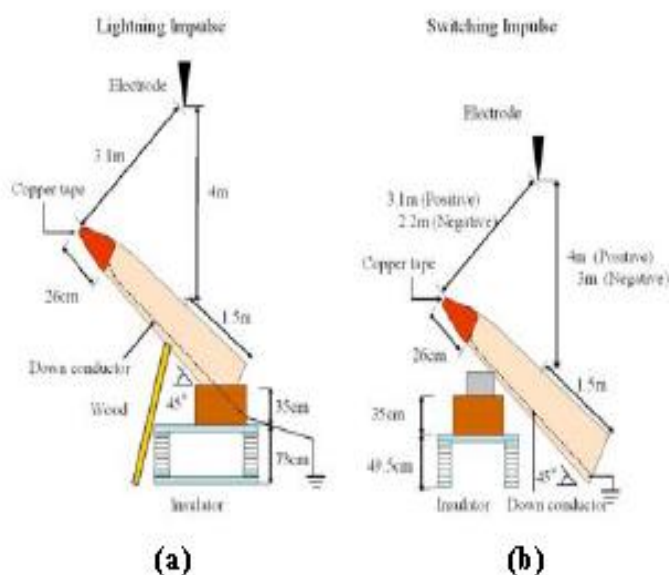
**Πίνακας 4: Πειραματικά αποτελέσματα ενός πτερυγίου με δέκτη σε οριζόντιος θέση 2**

κυματομορφή		Συμπεριφορά εκκένωσης	Αριθμός εκκένωσης
<b>L.I</b> <b>(lightning impulse)</b>	<b>+</b>	<b>Διείσδυση στο πτερύγιο</b>	<b>4</b>
	<b>-</b>	<b>Επαφή με το δέκτη</b>	<b>4</b>
		<b>Διείσδυση στο πτερύγιο</b>	<b>1</b>
<b>S.I</b> <b>(switching impulse)</b>	<b>+</b>	<b>Επιφανειακή ζημιά</b>	<b>8</b>
		<b>Διείσδυση στο πτερύγιο</b>	<b>4</b>
		<b>Επαφή με το δέκτη</b>	<b>2</b>
	<b>-</b>	<b>Επαφή με το δέκτη</b>	<b>10</b>
		<b>Επιφανειακή ζημιά</b>	<b>1</b>

## 6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΤΟ ΠΤΕΡΥΓΙΟ ΜΕ ΕΝΑ ΑΓΩΓΙΜΟ ΚΑΛΥΜΜΑ

### 6.1 Πτερύγιο με ένα αγώγιμο κάλυμμα

Σαν μια άλλη μέθοδο προστασίας για τα πτερύγια μιας ανεμογεννήτριας εκτός από τις παραπάνω μεθόδους χρησιμοποιείται ακόμα και η μέθοδος με ένα μεταλλικό-καπάκι και με έναν αγωγό καθόδου στην άκρη του πτερυγίου. Προκειμένου να ερευνηθεί η αποτελεσματικότητα του συγκεκριμένου προστασίας, τα ακόλουθα πειράματα εκτελέστηκαν.



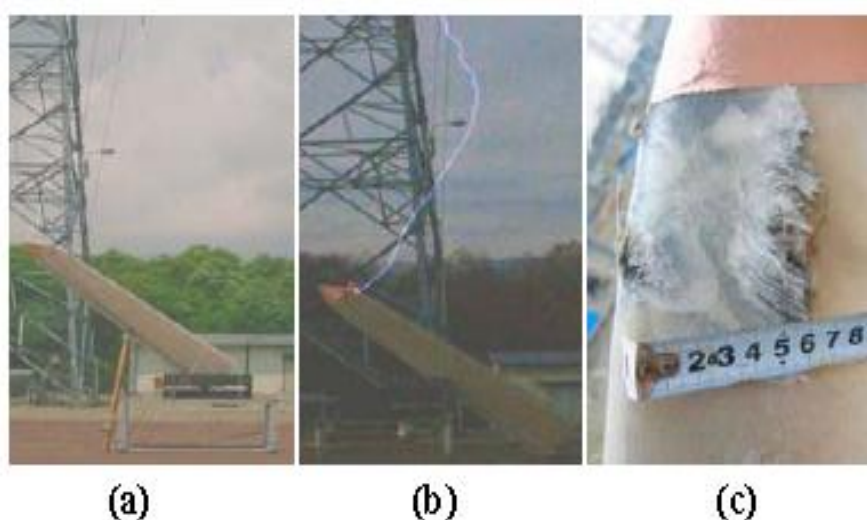
Σχήμα 8: Πειραματική εγκατάσταση του πτερυγίου με αγώγιμο κάλυμμα.

### **α)lightning impulse b)switching impulse**

Το πάνω τμήμα του πτερύγιο μήκους 260 mm καλύφθηκε εντελώς με μια ταινία από χαλκό, και συνδέθηκε με τον αγωγό καθόδου. Το πτερύγιο τοποθετήθηκε σε θέση πλαγίως ( $45^\circ$ ) όπως φαίνεται στο σχήμα 8.

Σε αυτό το πείραμα, η ρύθμιση της θέσης του πτερυγίου (απόσταση από το έδαφος) ήταν διαφορετική από τα προηγούμενα πειράματα.

Στις περισσότερες περιπτώσεις η εκκένωση χτύπησε κατευθείαν το πτερύγιο με το κάλυμμα όπως φαίνεται στο σχήμα 9(a) και το ρεύμα που δημιουργήθηκε από τον κεραυνό μεταφέρθηκε στο έδαφος μέσω του αγωγού καθόδου ακίνδυνα.



**Σχήμα 9: Συμπεριφορά κεραυνού σε πρότυπο πτερύγιο με αγωγίμο κάλυμμα. (a) Χτύπημα με το αγωγίμο κάλυμμα.(b) Χτύπημα στην άκρη του πτερυγίου. (c) Μέγεθος ζημιάς.**

Στο σχήμα 9(b) δείχνει την ζημιά που προκλήθηκε από την εκκένωση στην κορυφή του πτερυγίου ακριβώς κάτω από το καπάκι και στο σχήμα 9 (c) δείχνει την

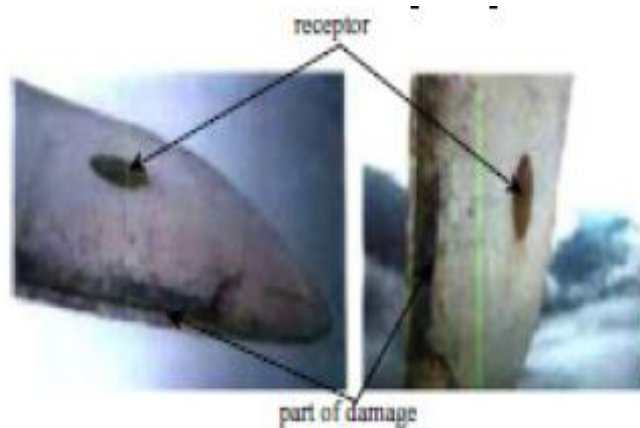
καταστρεμμένη περιοχή στο πτερύγιο.

Παρόλο που το αποτέλεσμα ήταν να προκληθεί τελικά ζημιά με το συγκεκριμένο σύστημα προστασίας φαίνεται να έχει την σχετικά υψηλότερη απόδοση πάνω στα πτερύγια. Εντούτοις, αυτό το αυτόνομο αγώγιμο κάλυμμα χαλκού δεν μπορεί να προστατεύσει ολόκληρο το πτερύγιο από τον κεραυνό

## **6.2 Επικάλυψη με χρώμα στο πτερύγιο.**

Άλλο ένα πείραμα που πραγματοποιήθηκε πάνω στην προστασία των ανεμογεννητριών θα αναλυθεί παρακάτω. Ο σκοπός αυτού του πειράματος είναι να προταθούν νέες μέθοδοι προστασίας για τις ανεμογεννήτριες οι οποίες αποτελούνται από το πτερύγιο καλυμμένο με χρώμα LPP(lightning paint protection).

Η μέθοδος με FRP προστασίας μεταβιβάζει την ηλεκτρική ενέργεια από το έδαφος στην κορυφή του πτερύγιο, ως αποτελέσματα όταν μια ανεμοθύελλα έρχεται, το ηλεκτρικό πεδίο είναι συγκεντρωμένο στην κορυφή του πτερυγίου και αυξάνει την πιθανότητα του χτυπήματος του κεραυνού. Λόγω της υψηλής τάσης που παράγεται από το χτύπημα του κεραυνού μεταξύ του εξωτερικά του πτερυγίου και του μετάλλου του πτερυγίου, προκαλεί ηλεκτρικό τόξο στο πτερύγιο και σπάζει τα πτερύγια των ανεμογεννητριών που αποτελούνται από FRP . Υπάρχουν περιπτώσεις των ατυχημάτων στα πτερύγια από κεραυνούς ακόμη και όταν τα πτερύγια ήταν προστατευμένα από το δέκτη (σχημα1). Αυτό σημαίνει ότι αυτή η μέθοδος προστασίας δεν είναι επαρκής .



**ΣΧΗΜΑ 10:Αποτυχία προστασίας με εφαρμογή του δέκτη.**

Η μέθοδος συστήνει την επένδυση των πτερυγίων με χρώμα προστασίας (LPP). Στην επιφάνεια του πτερυγίου LPP, τα μικρομόρια μετάλλων τοποθετούνται σε διαστήματα. Λόγω αυτής της τοποθέτησης των μικρομορίων του μετάλλου σε διαστήματα, το LPP είναι ένας μονωτής και δεν συγκεντρώνει το ηλεκτρικό πεδίο στην κορυφή του πτερυγίου. Αυτό σημαίνει ότι η πιθανότητα της εκκένωσης του κεραυνού πάνω στο πτερύγιο μειώνεται.

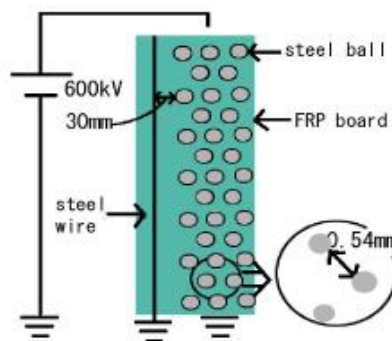
Ακόμα κι αν ο κεραυνός χτυπήσει το πτερύγιο, το LPP δεν προκαλεί ηλεκτρικό τόξο στο πτερύγιο, που σημαίνει ότι τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας προστατεύονται από τον κεραυνό. Τα αποτελέσματα από αυτό το πείραμα αυτό δείχνουν ότι η συγκεκριμένη μέθοδος προστασίας με LPP είναι ανώτερη από τις σύγχρονες μεθόδους προστασίας.

### **6.3 Πειραματική Διαδικασία**

Για να ανακαλύψουν εάν τα αγώγιμα μόρια που είναι τοποθετημένα σε διαστήματα δημιουργούν τόξο σπινθήρων ή όχι, έπρεπε να πραγματοποιηθούν κάποια πειράματα.

Σύμφωνα με την θεωρία Townsend, τα αγώγιμα υλικά σε διαστήματα προκαλούν ηλεκτρικό τόξο δηλαδή εμφανίζονται σπινθήρες όταν εφαρμόζεται υψηλή τάση λόγω της διαφοράς δυναμικού που δημιουργείται.

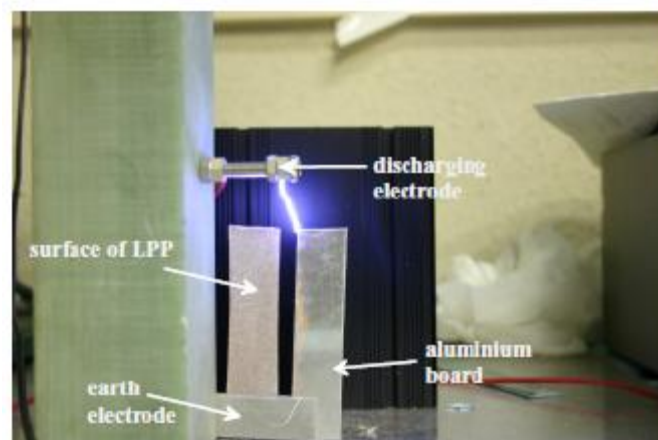
Για να ερευνηθεί και να μετρηθεί η συμπεριφορά του σπινθήρα χρειάστηκε να πραγματοποιηθεί η παρακάτω συνδεσμολογία (σχήμα 4). Σφαίρες από ασάλι και καλώδια από χάλυβα τοποθετήθηκαν όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4. Το διάστημα μεταξύ των σφαιρών ήταν 0,54 mm και 95 σειρές με σφαίρες χρησιμοποιήθηκαν. Η απόσταση μεταξύ της περιοχής της σφαίρας από χάλυβα και του χαλύβδινου καλωδίου ήταν 30 mm. Ο σπινθήρας προκλήθηκε με εφαρμογή τάσης 600kV, και εμφανίστηκε 20 φορές.



**ΣΧΗΜΑ 11:Εικόνα του παραδείγματος.**

Όταν ένα πτερύγιο χρωματισμένο από LPP δεχθεί πλήγμα από κεραυνό , θεωρείται ότι το ρεύμα που δημιουργεί ο κεραυνός θα κυκλοφορεί στην επιφάνεια του πτερυγίου και έτσι δεν θα προκαλεί ηλεκτρικό τόξο στο πτερύγιο. Το LPP είναι συνήθως ένας μονωτής, έτσι δεν προκαλεί πλήγματα από κεραυνούς λόγω της μη

συγκέντρωσης του ηλεκτρικού πεδίου. Για να εξεταστεί αυτή η θεωρία, ένας πίνακας FRP χρωματίστηκε με LPP και ένας πίνακας από αργίλιο τοποθετήθηκε και δέχτηκε 100 σπινθήρες με 600 kV τάση. Στην άλλη πλευρά συνδέθηκε ένα αγώγιμο καλώδιο από την κορυφή του πίνακα έως στο έδαφος. Αυτός ο πίνακας απελευθέρωσε ένα ηλεκτρόδιο με τάση 600kV. Κάθε φορά που το ρεύμα έρεε στην επιφάνεια του LPP, κανένας σπινθήρας δεν δημιουργήθηκε μέσω του αγωγού της αντίστροφης πλευράς και έτσι συμπεραίνουμε ότι το LPP ως μονωτικό υλικό δεν δημιουργεί σπινθήρες.



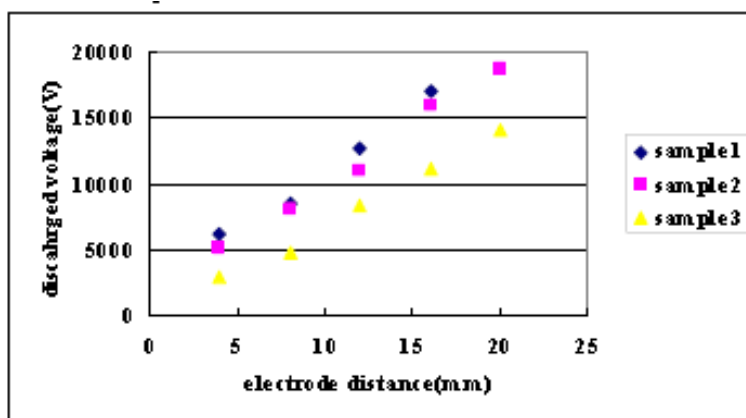
Σχήμα 12: Χαρακτηριστική εικόνα

#### 6.4 Μέτρηση της Τάσης των σπινθήρων

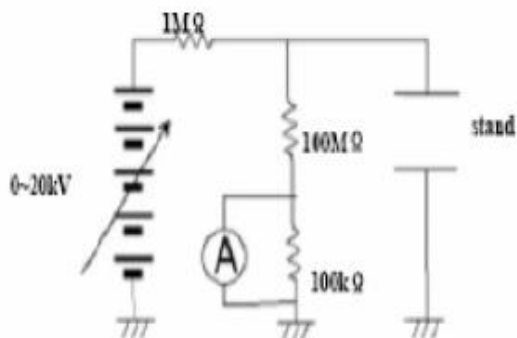
Για να εξεταστεί η θεωρία του LPP για τους σπινθήρες, ο πίνακας FRP χρωματισμένος με LPP χρησιμοποιήθηκε πάλι για να μετρήσει την τάση των σπινθήρων. Δύο διαφορετικά LPP χρησιμοποιήθηκαν με διαφορετικά είδη αγώγιμων μορίων.

Στο **σχήμα 14** παρουσιάζεται το πειραματικό κύκλωμα.





Σήμα 13: Διάγραμμα αποτελεσμάτων ισοδύναμου πειραματικού κυκλώματος.



ΣΧΗΜΑ 14: Ισοδύναμο πειραματικό κύκλωμα.

Ο πίνακας που χρωματίστηκε με LPP στερεώθηκε σε μια δομή, έπειτα συνεχής τάση εφαρμόστηκε και η τάση αυξήθηκε έως ότου εμφανιστεί ο σπινθήρας. Η τάση που εφαρμόστηκε στον πίνακα LPP μετρήθηκε  $101 \times 10^6$  (V). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου πειράματος διαπιστώνεται ότι το LPP προκαλεί σπινθήρες σε πολύ χαμηλή τάση. Επιπλέον, η ηλεκτρική αντίσταση του LPP στον πίνακα είναι ένας μονωτής. Το σχήμα 13 δείχνει ότι η χαμηλότερη τάση του σπινθήρα εμφανίζεται με το δείγμα 3 και η υψηλότερη εμφανίζεται με το δείγμα 1 έχει την υψηλότερη αγωγιμη πυκνότητα και το δείγμα 3 την χαμηλότερη. Αυτό δείχνει ότι όσο

υψηλότερη είναι η αγώγιμη πυκνότητα των μορίων , τόσο πιο χαμηλή θα είναι η τάση του σπινθήρα. Θεωρείται ότι η απόσταση του σπινθήρα γίνεται μικρή όταν η πυκνότητα των μορίων είναι υψηλή. Αυτή η διακοπή της χαμηλής τάσης δείχνει το ρεύμα που δημιουργεί ο κεραυνός να ρέει στην επιφάνεια των πτερυγίων που χρωματίζονται με LPP και όχι μέσα στα πτερύγια. Επιπλέον η μείωση τη τάσης πραγματοποιήθηκε με την χρησιμοποίηση των διαφορετικών ειδών και της πυκνότητας των αγώγιμων μορίων.

## **6.5 Πειραματικά αποτελέσματα σε FRP (Fiberglass) πτερύγια**

Στο επόμενο πείραμα, προγραμματίσαμε να προσομοιώσουμε μια εκκένωση στο  $\frac{1}{2}$  ενός πραγματικού μεγέθους πτερύγιο καθώς και σε πλήρη μεγέθη πτερυγίων. Ο κύριος σκοπός αυτού του πειράματος είναι να βρεθεί μια αποδοτική μέθοδος που να προστατεύει και να μην αποτυγχάνει με την μέθοδο της εφαρμογής ενός στρώματος αργιλίου. Εντούτοις, η εφαρμογή του αργιλίου που καλύπτει τα πτερύγια FRP δεν φαίνεται να είναι διαδεδομένη. Τα πτερύγια FRP αποτελούνται από ένα συνδυασμό πολυμερών στοιχείων,(πλαστικό ενισχυμένο με ίνες από γυαλί).

Αυτές οι μέθοδοι προστασίας μπορούν, εντούτοις, να μην είναι ικανοποιητικές, καθώς οι ζημιές από κεραυνό φαίνεται να εμφανίζονται ακόμα και όταν τέτοιες μέθοδοι προστασίας εφαρμοστούν.

Άλλες μέθοδοι προστασίας περιλαμβάνουν έναν αγωγό, πλέγμα μετάλλων, μια οθόνη αργιλίου (πλέγμα) και ένα μεταλλικό καπάκι στην άκρη.



**ΣΧΗΜΑ 15: Κατεστραμμένο πτερύγιο το 1999 στο Kochi στην Βόρεια Ιαπωνία.**

Πριν από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, επιβεβαιώθηκε η ικανότητα του στρώματος αργιλίου σε FRP, δεδομένου ότι το FRP ήταν εύκολα να καλυφτεί με θερμικό ψεκασμό.

Το στρώμα αργιλίου επιλέχτηκε επειδή στοχεύει στην ροή του ρεύματος που δημιουργεί ένας κεραυνός επάνω στην επιφάνεια των πτερυγίων.

Όταν δεν υπάρχει κανένα σύστημα προστασίας να χρησιμοποιείται, το ρεύμα του κεραυνού μπορεί να εισαχθεί μέσα στα πτερύγια λόγω ότι το νερό της βροχής είναι αγωγός και μπορεί να διαρρεύσει στα πτερύγια από τις ζημιές στην επιφάνεια. Το στρώμα από αργίλιο κάνει το ρεύμα να πάει πάνω από την εξωτερική επιφάνεια και τελικά να φτάσει στο κέντρο του πύργου παραγωγής.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με δύο ξεχωριστές μεθόδους, με υψηλή τάση και με μεγάλο ρεύμα. Σε περίπτωση της υψηλής τάσης, μια γεννήτρια κρουστικής τάσης χρησιμοποιήθηκε όπως φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 14.



**Σχήμα 16: Γεννήτρια κρουστικής τάσης 6 MV και εγκατάσταση της επίπεδης βάσης από FRP**

Στην περίπτωση των πειραμάτων των μεγάλων και των άμεσων ρευμάτων, χρησιμοποιήθηκε μια εφαρμογή όπου παρουσιάζεται στο σχήμα 15, το οποίο είναι ένας χώρος με εξοπλισμό πυκνωτών μεγάλων ρευμάτων.



**Σχήμα 17: Τράπεζα πυκνωτών για το πείραμα με τα μεγάλα ρεύματα**

Η χωρητικότητα της γεννήτριας κρουστικής τάσης είναι 6 MV. Η πραγματική τάση που εφαρμόζεται ήταν 2 MV. Η τάση που εφαρμόστηκε στα δείγματα ήταν 400-1,000 kV. Το ρεύμα που υπολογίστηκε είναι 20 kA, το οποίο είναι 0,2 C.

Το σχήμα 16 παρουσιάζει μια γεννήτρια κρουστικής τάσης και δοκιμασμένα δείγματα FRP. Το μέγεθος των δειγμάτων δοκιμής είναι μήκος 2.500 mm, πλάτος 430 mm., και πάχος 4 mm. Τα δείγματα δοκιμής τοποθετήθηκαν σε μια βάση με πίσω βάσεις και μερικά χερούλια. Η απόσταση μεταξύ του δείγματος και της μπάρας είναι 500 mm. 3 υλικά από FRP κατασκευάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα.

Για κάθε είδος δείγματος, δύο συνθήκες προετοιμάστηκαν, δηλαδή με το στρώμα από αργίλιο, ή χωρίς στρώμα αργιλίου. Οι κύκλοι της εκκένωσης για κάθε δείγμα ήταν 10 για κάθε περίπτωση. Η πειραματική διαδικασία περιλάμβανε τάση φόρτισης 6 MV, και έπειτα την εκκένωση.

Για τα δείγματα με το στρώμα αργιλίου, η ζημία δεν ήταν τόσο σοβαρή, αλλά υπήρξαν μερικές περιοχές που παρουσίασαν τήξη αργιλίου. Το μέγεθος των περιοχών που υπέστησαν ζημιές ήταν περίπου 5-6 mm διάμετρο.



**ΣΧΗΜΑ 18: Δείγματα χωρίς επικάλυψη αργιλίου .Δεξιά 45 βαθμοί GFRP (30mm απόσταση διαμέτρου καψίματος .Αριστερά GFRP με οδοντωτό χαλκό (40mm απόσταση διαμέτρου καψίματος).**

## **Από τα παραπάνω πειράματα βρήκαν τα παρακάτω συμπεράσματα.**

Για τα δείγματα χωρίς επικάλυψη αργίλιου, όλες οι βάσεις FRP καταστράφηκαν και το είδος της ζημίας ήταν σοβαρό. Τα πειράματα στις προηγούμενες έρευνες παρέχουν δύο κατηγορίες ζημιών. Μια είναι καπνός και σκόνη όταν το ρεύμα του κεραυνού ρέει στην επιφάνεια του πτερυγίου. Η άλλη είναι έκρηξη του πτερυγίου όταν το ρεύμα πηγαίνει στο πτερύγιο. Όταν η τάση του κεραυνού είναι αρκετά υψηλή, η πτώση του κεραυνού μπορεί να είναι ικανή να διαπεράσει το πτερύγιο και πηγαίνει στο πτερύγιο. Όταν το ρεύμα του κεραυνού πηγαίνει στο πτερύγιο, η στιγμιαία άνοδος της θερμοκρασίας είναι αρκετά υψηλή για την εσωτερική πίεση μέσα στο πτερύγιο ώστε να εκραγεί. Μερικές αιτίες που υποχρεώνουν το ρεύμα να πηγαίνει στο πτερύγιο είναι η εσωτερική παρουσία του νερού ή νερό στον σωλήνα.

## **7.ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΜΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ**

### **7.1 Περιοχή τοποθέτησης ανεμογεννήτριας**

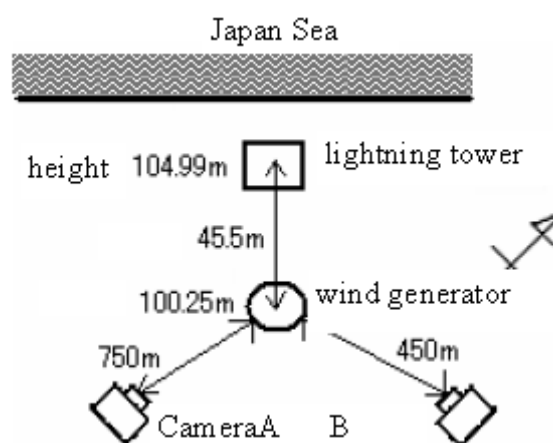
Το σχήμα 19 δείχνει την φωτογραφία μιας περιοχής με μια ανεμογεννήτρια και έναν πυλώνα. Το ύψος της κατασκευής της ανεμογεννήτριας και του πυλώνα είναι 100 m και 105 m, αντίστοιχα. Ο πυλώνας βρίσκεται 45 m μπροστά από την ανεμογεννήτρια. Το μήκος του πτερυγίου της ανεμογεννήτριας είναι 70,5 m και η εκτίμηση της ισχύς εξόδου είναι 1500 KW.



Σχήμα 19:Περιοχή ανεμογεννήτριας και του πυλώνα

## 7.2 Ρύθμιση των μονάδων μέτρησης

Το σχήμα 18 παρουσιάζει τον διακανονισμό των μονάδων μέτρησης. Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα, δύο φωτογραφικές μηχανές είχαν ρυθμιστεί να εστιάζουν στις 2 κατασκευές. Ένα μεγάλο πηνίο Rogowski χρησιμοποιείται για να μετρήεται το ρεύμα στην ανεμογεννήτρια και τέσσερα πηνία Rogowski είναι εξοπλισμένα χωριστά στα τέσσερα πόδια του πυλώνα.



Σχήμα 20:ρύθμιση μονάδες μέτρησης

Στα αποτελέσματα του παραπάνω πειράματος παρατηρήθηκαν συνολικά 30, 18 και 72 κεραυνοί, συμπεριλαμβανομένων των φωτογραφιών των κεραυνών και των κυματομορφών των ρευμάτων και για τις δύο κατασκευές (ανεμογεννήτρια και πυλώνα).

### 7.3 Οπτικά αποτελέσματα παρατήρησης

Στα σχήμα 20 και σχήμα 21 είναι χαρακτηριστικές φωτογραφίες εκκένωσης κεραυνού στον πυλώνα και στην ανεμογεννήτρια.



**Σχήμα 20: Εκκένωση κεραυνού στον πυλώνα.**

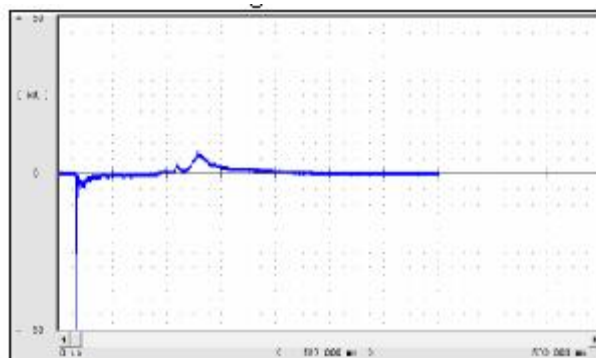




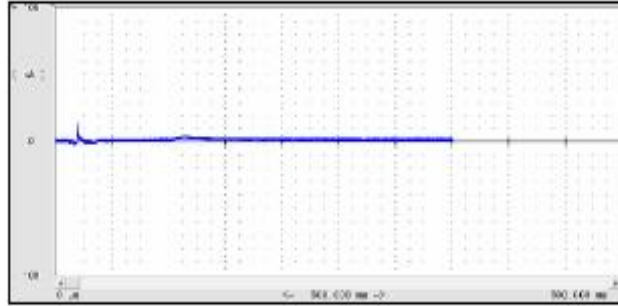
**Σχήμα 21: Εκκένωση κεραυνού στο πτερυγίο.**

#### **7.4 Αποτελέσματα μέτρησης Ρεύματος**

Στα σχήμα 22 και σχήμα 23 είναι οι κυματομορφές του ρεύματος που μετρήθηκαν χωριστά για την ανεμογεννήτρια και του πυλώνα αντίστοιχα. Το ρεύμα που δημιουργεί ο κεραυνός χτυπώντας την ανεμογεννήτρια αντιστοιχεί στο χτύπημα του πτερυγίου της ανεμογεννήτριας. Ο συνολικός χρόνος καταγραφής είναι 350 ms.



**Σχήμα 22: Το ρεύμα κατά την εκκένωση ενός κεραυνού στην ανεμογεννήτρια**



**Σχήμα 23: Το ρεύμα κατά την εκκένωση ενός κεραυνού στον πυλώνα**

## ΜΕΡΟΣ Γ΄

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΕΓΙΝΑΝ

Σύμφωνα με τις πειραματικές μελέτες που γίνανε και τα αποτελέσματα που πήραμε βλέπουμε ότι η πιο αποτελεσματική και ανώτερη από τις σύγχρονες μεθόδους είναι εκείνη που καλύπτει με χρώμα (LPP) όλο το πτερύγιο.

Και αυτό γιατί καλύπτει όλο το πτερύγιο και όχι ένα μέρος του. Γιατί συνήθως προστατεύουν μόνο τις άκρες του πτερυγίου και αυτό γιατί συνήθως εκεί υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα να χτυπήσει ο κεραυνός. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι δεν κινδυνεύει και το υπόλοιπο πτερύγιο.

Έτσι καλύπτουμε την επιφάνεια του πτερυγίου με (LPP). Το (LPP) είναι ένας μονωτής και δεν συγκεντρώνει το ηλεκτρικό πεδίο στην κορυφή του πτερυγίου. Και αυτό σημαίνει ότι η πιθανότητα κεραυνού πάνω στο πτερύγιο μειώνεται εν συγκρίσει με τα άλλα πειράματα. Και αυτό είναι απαραίτητο γιατί στις περιοχές που είναι φτιαγμένα τα αιολικά πάρκα είναι επιρρεπής στις έντονες καιρικές συνθήκες.

Όμως ακόμα και αν ο κεραυνός χτυπήσει το πτερύγιο, το (LPP) δεν προκαλεί ηλεκτρικό τόξο στο πτερύγιο και αυτό σημαίνει ότι τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας προστατεύονται από τις εκκενώσεις κεραυνών .

Δηλαδή όταν το πτερύγιο που είναι χρωματισμένο από (LPP) θεωρείται ότι το ρεύμα που δημιουργεί ο κεραυνός θα κυκλοφορεί στην επιφάνεια του πτερυγίου και έτσι δεν θα προκαλεί ηλεκτρικό τόξο στο πτερύγιο.

Τέλος σύμφωνα και με τις πειραματικές μελέτες που γίνανε πάνω στο πτερύγιο χρωματισμένο με (LPP) ως μονωτικό υλικό δεν δημιουργεί σπινθήρες.

## **ΕΠΙΛΟΓΟΣ**

### **ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ Α/Γ.**

Πτώση κεραυνού μπορεί να προκαλέσει καταστροφές τόσο στο μέρος που πλήττεται όσο και σε γειτονικές ανεμογεννήτριες ή συσκευές. Το ρεύμα του κεραυνού επιβάλλεται και δεν μπορούμε σε καμία περίπτωση να το μειώσουμε. Το μόνο που ενδεχομένως είναι στον έλεγχο μας είναι η αντίσταση που θα συναντήσει το ρεύμα στη διέλευση του από το σημείο πρόπτωσης προς τη γη. Αυτή η αντίσταση πρέπει να είναι κατά το δυνατόν μικρή.

Στη δίοδό του το ρεύμα επάγει τάσεις στα γειτονικά κυκλώματα, είτε λόγω επαγωγικής, είτε λόγω γαλβανικής σύμπλεξης π.χ. όταν το ρεύμα του κεραυνού διοχετευθεί σε ένα σύστημα κοινής γείωσης τότε θα επηρεασθούν όλες οι Α/Γ που θα έχουν κοινή γείωση. Έστω και ξεχωριστές να είναι οι γειώσεις δεν είναι δυνατή η απόζευξή τους.

Μέσω του εδάφους υπάρχουν γαλβανικές συμπλέξεις των διαφόρων γειώσεων που εμείς δεν τις έχουμε ενώσει με αγωγούς.

**Οι καταστροφές που διαπιστώθηκαν είναι στα ακόλουθα στοιχεία :**

- Στα πτερύγια από κατευθείαν πλήγμα του κεραυνού (πτερύγια έχουν ανοίξει).
- Στα ηλεκτρονικά από υπερτάσεις.
- Στους κινητήρες, μετασχηματιστές.
- Στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές των αιολικών πάρκων.

Οι Α/Γ 100-500 kW έχουν μαζί με τα πτερύγια τους ένα ύψος περίπου 35-70 m και ανήκουν στην περιοχή των “υψηλών αντικειμένων”, κατά τα αντικεραυνικά πρότυπα. Έτσι το πλήγμα του κεραυνού μπορεί να επέλθει τόσο στο υψηλότερο σημείο στην άκρη ενός πτερυγίου όσο και σε ένα ενδιάμεσο σημείο, στον πύργο , πράγμα που απέδειξε και η εμπειρία .

Θεωρείται πρακτικά ανέφικτο να αποφύγει κανείς το κατευθείαν πλήγμα του κεραυνού σε μια Α/Γ .

Τα πρότυπα που διέπουν την αντικεραυνική προστασία IEC 1024-1, IEC 1024-1-1, IEC 71, VDE 185 και τα ελληνικά ΕΛΟΤ 1197 εφαρμοζόμενα δεν κατόρθωσαν να εξασφαλίσουν 100% επιτυχία .Λόγω ιδιομορφίας των κατασκευών των Α/Γ γίνεται τώρα ιδιαίτερη έρευνα πάνω στο αντικείμενο, με σκοπό να μειωθούν οι κίνδυνοι στο ελάχιστο.

## **Προστασία των πτερυγίων και του συστήματος καθόδου.**

Το σύστημα που οδηγεί το ρεύμα από το σημείο πρόσπτωσης στο σύστημα της γείωσης ονομάζουμε σύστημα καθόδου. Εάν ο κεραυνός πλήξει το πτερύγιο, τότε το ρεύμα οδηγείται στον άξονα όπου είναι στερεωμένα η πλήμνη με τα πτερύγια . Από εκεί, μπορεί να διακλαδισθεί , ένα μέρος να προχωρήσει μέσω των οδοντωτών τροχών και του κιβώτιου της μηχανικής μετάδοσης στον πύργο και ένα άλλο μέρος μέσω ενός δακτυλίου γείωσης στην υπερκατασκευή (nacelle) και μέσω της αγωγίμης έδρασης της υπερκατασκευής στον πύργο

Ο δακτύλιος γείωσης είναι σύστημα κινούμενης επαφής , στρεφόμενου δακτυλίου- σταθερής ψήκτρας . Η ψήκτρα γειώνεται στην υπερκατασκευή . Έτσι ένα μεγάλο μέρος του ρεύματος θα περάσει από δακτύλιο και όχι από τους οδοντωτούς τροχούς της μετάδοσης προς την υπερκατασκευή.

Το ρεύμα αφού ρεύση κατά μήκος του πύργου οδηγείται στη γείωση και ακολούθως στο έδαφος . Η γείωση είναι θεμελιακή γείωση , ένας δακτύλιος περιμετρικά στο άκρο του θεμελίου της Α/Γ.

Προφανώς η αντίσταση γείωσης , έστω μερικά  $\Omega$ , με το ρεύμα του κεραυνού θα ανυψώσουν το δυναμικό της βάσης του πύργου ως προς την άπειρη γη κατά δεκάδες kV . Ο ουδέτερος αγωγός που είναι συνδεδεμένος με τον πύργο στη μια του άκρη , και στον ουδέτερο του μετασχηματιστή στην άλλη του άκρη , θα φέρει ένα ρεύμα αντιστρόφως ανάλογο προς την αντίδραση του.

Η ανύψωση του δυναμικού του ουδέτερου επιβάλλει μια τάση μεταξύ φάσεων και ουδέτερου ίση με την τάση του πύργου διαμορφωμένη κατά την επαγόμενη τάση στο

βρόχο των αγωγών ουδέτερου-φάσης .

Επειδή συνήθως τα καλώδια ισχύος είναι συνεστραμμένα , μπορεί κανείς να δεχθεί ότι η τάση των φάσεων ως προς τον ουδέτερο είναι ίση με την τάση μεταξύ βάσης του πύργου και άπειρης γης.

Εάν ο μετασχηματιστής συνδέεται και με άλλες Α/Γ ή φορτία τότε προφανώς και εκεί θα υπάρξει τάση μεταξύ των κυκλωμάτων τροφοδοσίας και άπειρης γης.

### **Προστασία πτερυγίων.**

Για την προστασία των πτερυγίων προβλέπονται μεταλλικά σημεία πρόσπτωσης κεραυνού επί του πτερυγίου , που συνδέονται με αγωγό με την πλήμνη και τον άξονα . Αν δεν γίνουν αυτά , πρόσπτωση κεραυνού σε πλαστικά πτερύγια οδηγεί συνήθως σε καταστροφή τους , ακόμα και αν αυτά είναι ενισχυμένα με ανθρακοΐνες .

### **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:**

- Ø [1] IEC 60050(426): 1990. International Electrotechnical Vocabulary- Chapter 426: Electrical apparatus for explosive atmospheres.
- Ø [2] IEC 61000-5-2. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5: InstaNation and mitigation guidelines- Section 2: Earthing and cabling.
- Ø [3] IEC 61643-1:2005.Low-voltage surge protective devices- Part 1: Surge protective devices connected to low- voltage power distribution systems- Requirements and tests.
- Ø [4] EN 50164 (all parts).Lightning Protection Components (LPC).
- Ø [5] EN 50164-1:1999.Lightning Protection Compenents (LPC) - Part 1: Requirements for connection components.
- Ø [6] S. Yokoyama, and N.J. Vasa : “ Study on Lightning Damage of Wind Turbine Blades and Protection Methodof Them ”, Tha Papers of Joint Technical Meeting on Electrical Discharges and High Voltage Engineering, IEE Japan, ED-02-56 (HV-02-40),pp.31-36,2002[in Japanece].
- Ø [7] I. Cotton, B. McNiff, T. Soerenson, W. Zischank, P. Pettersson and E. Muljadi: “Lightning Protection for Wind Turbines ”, Proceedings of the 25<sup>th</sup> International Conference on Lightning Protection (ICLP), (Rhodes, Greece), pp. 848-853, 2000.
- Ø [8] A. Wada and S.Yokoyama: “Lightning Damages of Wind Turbine Blades in Winter in Japan- Lightning Observation on the Nikaho-Kogen Wind Farm”, Proceedings of the 27<sup>th</sup> International Conference on Lightning Protection (ICLP) , (Avignon, france), pp.947-952, 2004.
- Ø [9] S.Yokoyama, N. J. Vasa : “Manner of Lightning Attachment to Non-conductive Wind Turbine Blades”, Proceedings of the 27<sup>th</sup> International Conference on Lightning Protection (ICLP), (Avignon, France), pp.936-940, 2004.
- Ø [10] T. Naka, N. J. Vasa, S. Yokoyama, A. Wada, A. Asakawa, H. Honda, K. Tsutsumi, S. Arinaga: “Study on Lightning Protection Methods for Wind Turbina Blades” , IEEJ Trans. PE, Vol. 125, No. 10,pp.993-999,2005.
- Ø [11] S. Yokoyama, K. Miyake, T.Suzuki and S.Kanao: “Winter Lightning on Japan Sea Coast- Development of Measuring System On Progressing Feature of Lightning Discgarge”, IEEE Trans., Vol. PWRD -5, No 3, pp. 1418- 1425, 1990.
- Ø [12] R.H.Golde, Lightning Volume 2, Lightning Protection Academic Press, 1997.
- Ø [13] F.A Fisher, J.A. Plumer, and et al, Lightning Protection of Aircraft, Lightning Technology Inc., 1999.
- Ø [14] H.Sakamoto et al , “Lightning Protection of FRP Blades for Wind Power Generators,”WREC, Denver, 2004.
- Ø [15] Sakamoto H. and Hanai M., “Reproduction of FRP Blade Failure for Wind Power Generators by Lightning and its Mechanism, “JSME International Journal, Series A, Vol. 48, No. 4, Nov., 2005, p465-471
- Ø [16] IEC- International Electrotechnical Comission (TR 61400-24)
- Ø [17] E. Muljadi and S. Butterfield, Lightning Protection of Wind Turbine Generator Systems and EMC Problems in the Associated Control Systems, NREL Report.
- Ø [18] B. Brian and E. Muljadi., The NREL Wind Turbine Lightning



**Protection project, 1999 European Wind Energy Conference, 1-5 March, 1999, Nice France, p729-732.**

- Ø [19] S. Minamimura, H. Sakurano, M.Hashimoto, “Observation of Winter Lightning Discharge at Uchinada Wind Power Site”, IEIEJ Annual Meeting, Sept., 2004 (in Japanese)**
- Ø [20] K.Nakamura, H.Sakurano,“Lightning Damage and Protection Technique for Wind Farm in Winter Japan”, ICGE&1<sup>ST</sup> ICLPE (Ground 2004 & 1<sup>st</sup> LPE),Belo Horizonte-Brazil, 2004**