



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ  
& ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Μέτρηση αντίστασης ηλεκτρομονωτικών υλικών

Κυριάκου Ορέστης

Επιβλέπων : Μπούρκας Περικλής  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Φεβρουάριος 2009





# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ  
& ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Μέτρηση αντίστασης ηλεκτρομονωτικών υλικών

Κυριάκου Ορέστης

Επιβλέπων : Μπούρκας Περικλής  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την: .....

.....

Μπούρκας Π.

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Καραγιαννόπουλος Κ.

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Θεοδώρου Ν.

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Φεβρουάριος 2009



.....  
Κυριάκου Α. Ορέστης  
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός  
και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Κυριάκου Ορέστης, 2008

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα .

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



Ευχαριστίες,

Στον καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Ε.Μ.Π κύριο Μπούρκα Περικλή για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και στον κ. Τσαραμπάρη Παναγιώτη, Δρ-Μηχανικό Ε.Μ.Π. για τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε καθώς και για τις καθοριστικής σημασίας υποδείξεις και συμβουλές του.





## Περίληψη

Η παρούσα εργασία εξετάζει την αντίσταση μόνωσης διαφόρων μονωτικών υλικών υπό την μορφή φύλλου. Χωρίζεται σε τέσσερα κεφάλαια:

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται αναφορά στη θεωρία των ηλεκτρομονωτικών υλικών που χρησιμοποιούνται σε διάφορες ηλεκτρομηχανολογικές εφαρμογές.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρατίθενται οι διατάξεις των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν και παρουσιάζεται βήμα βήμα η διαδικασία των μετρήσεων αντίστασης μόνωσης των διαφόρων μονωτικών υλικών.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων υπό την μορφή πινάκων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται επεξεργασία των μετρήσεων και καταγράφονται γραφικές παραστάσεις επί των μετρήσεων. Επίσης αυτό το κεφάλαιο περιλαμβάνει σχόλια και παρατηρήσεις.

**Λέξεις κλειδιά :** αντίσταση μόνωσης, αντίσταση όγκου, αντίσταση επιφάνειας, ηλεκτρομονωτικά υλικά, μονωτικά φύλλα.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή

1.1 Κατηγορίες μονωτικών υλικών και ιδιότητες.....	15
1.2 Οι φορείς στα μονωτικά υλικά.....	22
1.3 Δύναμη μεταξύ φορτίων - διηλεκτρική σταθερά.....	23
1.4 Χωρητικότητα μονωτών.....	24
1.5 Συντελεστής απωλειών ( $\tan\delta$ ).....	25
1.6 Απώλειες ενέργειας του διηλεκτρικού.....	26
1.7 Πόλωση υλικών	
1.7.1 Το διάνυσμα της πόλωσης.....	27
1.7.2 Μηχανισμοί πόλωσης.....	30
1.8 Διηλεκτρική αντοχή και διάσπαση μόνωσης στερεών υλικών.....	33
1.9 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών.....	34
1.9.1 Μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών.....	35
1.9.1.1 Η θερμική διάτρηση.....	35
1.9.1.2 Η ηλεκτρική διάτρηση.....	36
1.9.1.3 Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων.....	39
1.9.1.4 Θερμοχημική Διάτρηση.....	41
1.10 Αντίσταση όγκου - Ειδική αντίσταση όγκου.....	42
1.11 Αντίσταση επιφάνειας - Ειδική αντίσταση επιφάνειας.....	44
1.12 Σημασία μέτρησης Αντίστασης μόνωσης στα μονωτικά υλικά.....	46
1.13 Παράγοντες που επηρεάζουν την αντίσταση μόνωσης	
1.13.1 Εξάρτηση αντίστασης μόνωσης από το ρεύμα.....	47
1.13.2 Εξάρτηση αντίστασης μόνωσης από τη θερμοκρασία.....	48
1.13.3 Επίδραση υγρασίας και ρύπανσης στην αντίσταση μόνωσης.....	49

### Κεφάλαιο 2 : Διάταξη και η διαδικασία των μετρήσεων

2.1 Γενικά.....	51
2.2 Η Διάταξη των μετρήσεων.....	51
2.3 Η Διαδικασία των μετρήσεων	
2.3.1 Η διαδικασία για τις μετρήσεις ειδικής αντίστασης όγκου.....	54
2.3.2 Η διαδικασία για τις μετρήσεις μεταβολής αντίστασης όγκου με μεταβολή της εξασκούμενης δύναμης.....	54



2.3.3 Η διαδικασία για τις μετρήσεις ειδικής αντίστασης επιφάνειας.....	54
<b>Κεφάλαιο 3 : Αποτελέσματα των Μετρήσεων</b>	
3.1 Αποτελέσματα μετρήσεων της αντίστασης όγκου.....	55
3.2 Αποτελέσματα μετρήσεων μεταβολής της αντίστασης όγκου με την μεταβολή του βάρους των ηλεκτροδίων.....	69
3.3 Αποτελέσματα μετρήσεων της αντίστασης επιφάνειας.....	70
<b>Κεφάλαιο 4 : Επεξεργασία των μετρήσεων και σχόλια επί των αποτελεσμάτων</b>	
4.1 Επεξεργασία των μετρήσεων.....	77
4.2 Μετρήσεις αντίστασης όγκου.....	90
4.3 Μετρήσεις μεταβολής αντίστασης όγκου με τη μεταβολή του βάρους των ηλεκτροδίων .....	98
4.4 Μετρήσεις ειδικής αντίστασης επιφάνειας.....	99
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ : Όργανο Μέτρησης METRISO 5000D-PI 5000V.....	105
Βιβλιογραφία .....	107



# **Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή**

## **1.1 Κατηγορίες μονωτικών υλικών και ιδιότητες**

Για να επιλεγθεί ένα μονωτικό υλικό για μια εφαρμογή, πρέπει οι ιδιότητες του να ανταποκρίνονται σε αυτήν την εφαρμογή. Ως πλεονεκτήματα ενός μονωτικού υλικού μπορούν να θεωρηθούν οι χαμηλές διηλεκτρικές απώλειες, η υψηλή διηλεκτρική αντοχή, η υψηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση, η σταθερότητα των ηλεκτρικών ιδιοτήτων σε διάφορες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, της συχνότητας και του περιβάλλοντος. Επίσης, σημαντικοί παράγοντες για την αξιολόγηση του υλικού είναι και η μεταβολή των μηχανικών, φυσικών και χημικών ιδιοτήτων με τη θερμοκρασία. Τέλος, το πόσο οικονομικό είναι ένα υλικό είναι ένας άλλος παράγοντας που εξετάζεται για τη χρήση του σε μια εφαρμογή.

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός υλικών που χρησιμοποιούνται για μονωτικούς σκοπούς :

### **1.1.1 Τα εμποτισμένα φύλλα**

Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται ευρέως ως μονωτές. Ο εμποτισμός αντικαθιστά τον αέρα μέσα στο χαρτί με ένα υλικό που έχει μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή και προστατεύει το χαρτί από την απορρόφηση υγρασίας. Ο συντελεστής απωλειών κυμαίνεται από λιγότερο του 0,002 έως περίπου 0,003 για πυκνότητες μεταξύ 0,7 και 1,1g/cm<sup>3</sup> σε θερμοκρασία δωματίου. Αυτή η ιδιότητα, στους 60°C παίρνει την ελάχιστη τιμή της και αυξάνεται στο 0,0035 στους 100°C. Ο συντελεστής απωλειών πρακτικά δεν επηρεάζεται από πεδία έως 200kV/cm. Μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή απωλειών μπορεί να εμφανιστεί από τον μη επαρκή εμποτισμό του χαρτιού, τη μόλυνση του υλικού, τις ατέλειες του ηλεκτροδίου και την απορρόφηση υγρασίας. Επιπρόσθετα, οι διηλεκτρικές σταθερές αυτών παίρνουν τιμές συνήθως πάνω από 2,5. Μέχρι περίπου τα 1000Hz, η διηλεκτρική σταθερά μειώνεται λίγο, ενώ είναι σχεδόν σταθερή πέραν αυτής της συχνότητας. Τα καλά εμποτισμένα χαρτιά έχουν ειδική αντίσταση περίπου 10<sup>17</sup>Ω.cm.

### **1.1.2 Μονωτικά λάδια υδρογονανθράκων**

Χρησιμοποιούνται για τον εμποτισμό χαρτιών και την πλήρωση καλωδίων κενών πυρήνων. Οι ιδιότητές τους καθορίζονται από τα ακατέργαστα λάδια από όπου προέρχονται και από τις διαδικασίες που γίνονται για τον εξευγενισμό τους. Οι ποσότητες των πολικών ή/και των αγώγιμων φάσεων στα λάδια αντικατοπτρίζονται στις ηλεκτρικές τους ιδιότητες. Οι τιμές του συντελεστή απωλειών μεταβάλλονται από 0,00001 έως 0,00005, ενώ οι τιμές της ειδικής αντίστασης βρίσκονται στην περιοχή από 10<sup>15</sup>Ω.cm ως 10<sup>17</sup>Ω.cm. Επίσης, ο

μέσος όρος της διηλεκτρικής τους σταθεράς είναι 2,3, ενώ η διάσπαση του διηλεκτρικού παρατηρείται στα 400-500kV/cm. Τέλος, τιμές της διηλεκτρικής αντοχής έως 1000kV/cm έχουν παρατηρηθεί σε ειδικά παρασκευασμένα λάδια.

### **1.1.3 Χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες**

Χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες όπως το χλωριωμένο διφαινύλιο και βενζολικές ενώσεις χρησιμοποιούνται ως μονωτές σε πυκνωτές και μετασχηματιστές. Είναι ακριβότεροι από τα λάδια, αλλά παρουσιάζουν ορισμένα πλεονεκτήματα έναντι αυτών. Δεν είναι ούτε εύφλεκτα, ούτε εκρηκτικά υλικά σε συνθήκες δημιουργίας ηλεκτρικού τόξου. Επίσης έχουν τιμές διηλεκτρικής αντοχής συγκρίσιμες αυτές των λαδιών υδρογονανθράκων και οι οποίες είναι σταθερές υπό κανονικές συνθήκες ενώ έχουν αποδεκτές τιμές για τον συντελεστή απωλειών. Ωστόσο, οι ιδιότητες τους διαφέρουν ανάλογα με τη μοριακή τους δομή. Η διηλεκτρική τους σταθερά είναι σχετικά υψηλή και κυμαίνεται από 4 έως 6. Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί και απαγορεύσεις σε ορισμένες περιπτώσεις σχετικά με τη χρήση τους καθώς θεωρούνται επικίνδυνα υλικά για το περιβάλλον και την υγεία.

### **1.1.4 Συνθετικά και φυσικά ελαστικά**

Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται ευρέως ως μονωτές σε σύρματα και καλώδια. Εμφανίζουν υψηλό βαθμό ελαστικότητας, αντίσταση στη φθορά, σκληρότητα, αντοχή σε χημική διάβρωση και έχουν καλές διηλεκτρικές ιδιότητες. Τα περισσότερα μη πολικά υλικά έχουν μικρές διπολικές ροπές. Ο βουλκανισμός των ελαστικών (σκλήρυνση δια του θείου με θέρμανση) αυξάνει τις διπολικές ροπές τους αλλά τα περισσότερα από αυτά τα υλικά δεν είναι υψηλά πολικά. Τα είδη πόλωσης που εμφανίζονται σε αυτά τα υλικά είναι η ηλεκτρονική πόλωση, η ατομική πόλωση και η ιοντική πόλωση προσανατολισμού. Το μη βουλκανισμένο ελαστικό έχει διηλεκτρική σταθερά περίπου 2,4 και συντελεστή απωλειών περίπου 0,003 σε θερμοκρασία δωματίου ενώ το βουλκανισμένο ελαστικό έχει διηλεκτρική σταθερά περίπου 2,6 και συντελεστή απωλειών περίπου 0,04 (οι τιμές αυτές υπολογίστηκαν σε συχνότητα 1000Hz). Η διάσπαση του διηλεκτρικού εμφανίζεται για πεδία 300 και 600V/mil (1 V/mil ισούται με 393,33V/cm) ενώ η ειδική ηλεκτρική αντίσταση αυτών κυμαίνεται από  $10^{14}$  ως  $10^{16}$ Ω.cm.

### **1.1.5 Πλαστικά ή υψηλά συνθετικά πολυμερή**

Έχουν έναν καλό συνδυασμό θερμικών, μηχανικών και χημικών ιδιοτήτων. Η διηλεκτρική σταθερά του πολυαιθυλενίου είναι περίπου 2,3 στους 20°C και είναι ανεξάρτητη της



συχνότητας όταν αυτή κυμαίνεται σε τιμές από 50 ως 10000Hz. Ο συντελεστής απωλειών του κυμαίνεται μεταξύ 0,00001 και 0,00002 μέχρι τα 1000Hz ενώ η διάσπαση του διηλεκτρικού συμβαίνει, για 50Hz και θερμοκρασία 20 °C, για τιμή πεδίου κοντά στα 500kV/cm. Αυτού του είδους τα υλικά δείχνουν μικρή τάση για απορρόφηση νερού. Το πολυστυρένιο και το χλωρίδιο του πολυβινυλίου έχουν ιδιότητες αντιπροσωπευτικές των περισσότερων πλαστικών. Η διηλεκτρική σταθερά του χλωριδίου του πολυβινυλίου είναι περίπου 3,0 και ο συντελεστής απωλειών περίπου 0,02 για συχνότητες ως 1MHz. Η διάσπαση του διηλεκτρικού συμβαίνει για τιμές πεδίου από 50 έως 200V/mil. Τα φύλλα πολυεστέρα Mylar είναι πολύ χρήσιμα σε πυκνωτές σε μέτριες θερμοκρασίες καθώς οι μηχανικές τους ιδιότητες είναι περίπου σταθερές για θερμοκρασίες στην περιοχή των μειών 20 έως 80 °C. Σε τιμές θερμοκρασίας πέραν αυτής της περιοχής, το μέτρο ελαστικότητας καθώς και η τάση αντοχής μειώνονται πολύ. Η διηλεκτρική τους σταθερά είναι περίπου 3,1 , ο συντελεστής απωλειών τους 0,005 στους 15 σε θερμοκρασία 25 °C, ενώ η διηλεκτρική τους διάσπαση συμβαίνει στα 8000-12000V/cm.

#### **1.1.6 Φαινολικές ρητίνες**

Χρησιμοποιούνται ως περιβλήματα για αγωγούς ή για τον εμποτισμό στοιχείων όπως τυλίγματα πηνίων και μηχανών. Η χρήση διαλυτών για την επικόλληση αυτών των υλικών έχει ως αποτέλεσμα την πρακτικά αδύνατη δημιουργία εξ ολοκλήρου επικαλυμμένου τυλίγματος. Οι φυσαλίδες που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ωρίμανσης, αφήνουν ακάλυπτα μέρη στις αγωγίμες επιφάνειες. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αποφευχθεί χρησιμοποιώντας ρητίνες που δεν απαιτούν χρήση διαλυτών. Περιβλήματα αυτού του είδους εμποδίζουν την υγρασία ή και άλλους ανεπιθύμητους παράγοντες του περιβάλλοντος. Επιπρόσθετα, ως υλικά εμποτισμού ενισχύουν στοιχεία όπως τα τυλίγματα στερεώνοντας τους αγωγούς μαζί και επιτυγχάνοντας την αποτελεσματική θωράκιση τους.

#### **1.1.7 Ελάσματα συνδεδεμένα με ρητίνη (resin-bonded laminates)**

Είναι φτιαγμένα από χαρτί, ύφασμα, αμίαντο και άλλα υλικά. Οι ιδιότητες των ελασμάτων εξαρτώνται από τα στοιχεία από τα οποία αποτελούνται. Οι τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς αυτών κυμαίνονται από 4,5 με 7,0 και οι τιμές του συντελεστή απωλειών από 0,03 με 0,10 στα 1MHz. Τα ελάσματα από χαρτί έχουν διηλεκτρική αντοχή περίπου 500V/mil. Τα υφασμάτινα ελάσματα υφίστανται διάσπαση σε τιμές πεδίου από 150 έως 500 V/mil . Τα περισσότερα ελάσματα έχουν ειδική αντίσταση μεταξύ  $10^{15}$  και  $10^{16}\Omega\cdot\text{cm}$ .

### **1.1.8 Πυριτικά**

Παρουσιάζουν καλές διηλεκτρικές ιδιότητες σε μια μεγάλη περιοχή συχνοτήτων. Οι φυσικές τους ιδιότητες είναι σχετικά σταθερές συγκρινόμενες με οργανικά υλικά και είναι χημικά αδρανή. Τα πυριτικά ελαστικά χρησιμοποιούνται πρωτίστως για σκοπούς ηλεκτρικής μόνωσης. Η διηλεκτρική τους σταθερά επηρεάζεται λίγο σε σχέση με τη θερμοκρασία και κυμαίνεται σε τιμές από 3 ως 10 για μέτρηση στα 10kHz. Ο συντελεστής απωλειών κυμαίνεται περίπου στο 0,03 για την ίδια συχνότητα μέτρησης και η διάσπαση του διηλεκτρικού συμβαίνει για τιμές πεδίου μεταξύ 1 και 10kV/cm.

### **1.1.9 Κεραμικά**

Τα κεραμικά έχουν τις περισσότερες εφαρμογές τους ως μονωτικά υλικά. Η διηλεκτρική τους σταθερά και ο συντελεστής απωλειών αυξάνουν σχετικά γρήγορα με τη θερμοκρασία και τη συχνότητα. Όσο ψηλότερη είναι η συχνότητα, τόσο μικρότερη θα είναι και η επίδραση της θερμοκρασίας στη διηλεκτρική αντοχή και τους συντελεστές απωλειών. Η διηλεκτρική σταθερά αυτών κυμαίνεται από 4,5 έως 9, ο συντελεστής απωλειών από 0,003 μέχρι 0,2 ενώ η διηλεκτρική αντοχή κυμαίνεται από 3 μέχρι 50kV/mm. Τα κεραμικά έχουν καλές μηχανικές ιδιότητες και σταθερότητα διαστάσεων. Είναι χημικά σταθερά υλικά και χρησιμοποιούνται ευρέως σε εξωτερικούς χώρους λόγω της καλής τους αντίστασης στη διάβρωση και της χαμηλής τους διαπερατότητας σε αέρια. Επίσης, έχουν χαμηλές απώλειες και έχουν σχετικά χαμηλό οικονομικό κόστος.

### **1.1.10 Γυαλιά**

Τα γυαλιά είναι μείγματα του οξειδίου του πυριτίου και άλλων οξειδίων, είναι πολύ ιξώδη υλικά στην τηγμένη κατάσταση. Τα γυαλιά διατηρούν την όμοια με τα υγρά, μη κρυσταλλικότητα στη δομή τους, και σε θερμοκρασία δωματίου ουσιαστικά είναι υπερκρύα (supercooled) υγρά.

Η σύστασή τους είναι τέτοια ώστε να υπάρχει ένας μικρός περιορισμός στον αριθμό και στην ποσότητα των οξειδίων που μπορούν να προστεθούν στη βάση πυριτίου. Όπως είναι επομένως αναμενόμενο, οι ιδιότητες των γυαλιών ποικίλουν, ανάλογα με τη σύστασή τους. Τα περισσότερο κοινά γυαλιά είναι γυαλιά πυριτικού νατράσβεστου (κυρίως  $\text{SiO}_2, \text{CaO}, \text{Na}_2\text{O}$ ). Άλλοι τύποι είναι τα βοριούχα πυριτικά γυαλιά και τα γυαλιά μολύβδου. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση αυτών κυμαίνεται στην περιοχή των  $10^{10}$  έως  $10^{20} \Omega \cdot \text{cm}$ . Η μικρή αγωγιμότητα οφείλεται στα ιόντα. Αυτή προέρχεται κυρίως από τη διάχυση των ιόντων νατρίου στο υψηλά διαταραγμένο πυριτικό πλέγμα, που μοιάζει με υγρό. Άλλα

κατιόντα, όπως το κάλλιο, το ασβέστιο και το μαγνήσιο είναι μεγαλύτερα σε μέγεθος και έχουν μικρότερες κινητικότητες από τα ιόντα νατρίου και επομένως συνεισφέρουν μόνο λίγο στην ηλεκτρική αγωγιμότητα. Αυτοί οι παράγοντες εξηγούν τις υψηλές ειδικές τους αντιστάσεις και τους αρνητικούς θερμοκρασιακούς συντελεστές αντίστασης των γυαλιών. Ένα τυπικό γυαλί, μπορεί να επιδείξει μια μείωση στην ειδική του αντίσταση, από  $10^{16}\Omega\cdot\text{cm}$  στη θερμοκρασία δωματίου, σε  $10^9\Omega\cdot\text{cm}$  σε θερμοκρασία  $300^\circ\text{C}$ . Η διηλεκτρική σταθερά των εμπορικών γυαλιών κυμαίνεται από 3,7 ως 10. Το κοινό νατρασβεστικό (soda-lime) γυαλί έχει διηλεκτρική σταθερά από 7 ως 8. Οι διηλεκτρικές ιδιότητες των γυαλιών είναι αποτέλεσμα κυρίως της ηλεκτρονικής πόλωσης με μια μικρή συνεισφορά των μετακινήσεων των ιόντων που παρακινούνται από το ηλεκτρικό πεδίο. Έτσι η διηλεκτρική αντοχή των γυαλιών είναι πρακτικώς ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία.

Οι διηλεκτρικές απώλειες στα γυαλιά εξαρτώνται από τη συχνότητα. Ο συντελεστής απωλειών είναι περίπου 0,02 στα 1000Hz και παίρνει την ελάχιστη τιμή του, περίπου 0,01, στα  $10^7\text{Hz}$ , ενώ για μεγαλύτερες συχνότητες αυξάνει απότομα και φτάνει πάλι την τιμή 0,02 στα  $10^{10}\text{Hz}$ . Θεωρείται ότι οι αυξημένες απώλειες στις υψηλές συχνότητες είναι αποτέλεσμα των απωλειών των δονήσεων.

Οι τιμές της διηλεκτρικής αντοχής των γυαλιών σε συνθήκες εργαστηρίου κυμαίνονται από 3000 έως 5000kV/cm.

### **1.1.11 Μίκα**

Η μίκα είναι ένα γενικό όνομα για ένα σύνολο φυσικών ορυκτών με ελασματώδεις δομές. Αυτό τους επιτρέπει να χωρίζονται σε λεπτά φύλλα. Αυτά τα ορυκτά έχουν χαμηλές διηλεκτρικές απώλειες, υψηλή διηλεκτρική αντοχή, υψηλή αντίσταση σε μέτριες θερμοκρασίες και καλές μηχανικές ιδιότητες όταν είναι σε μορφή λεπτών φύλλων. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα φύλλα αυτά τείνουν να χωριστούν σε πολλά λεπτότερα ελάσματα σε υψηλές θερμοκρασίες.

Τα φύλλα έχουν μικρή ευκαμψία και δεν μπορούν να πλαθούν. Η μίκα είναι διαθέσιμη σε πολλές κατηγορίες, που εξαρτώνται από τη σύνθεση της και την περιεκτικότητα σε ακαθαρσίες. Μια υψηλής ποιότητας μίκα έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε ακαθαρσίες, είναι διαφανής και λεία ενώ έχει διηλεκτρική αντοχή μεγαλύτερη από 1500V/mil. Η διηλεκτρική αντοχή της μίκας είναι περίπου 5,4 και είναι σχεδόν ανεξάρτητη από τη συχνότητα για περιοχές συχνοτήτων από 1kHz μέχρι 3000MHz ενώ ο συντελεστής απωλειών σε αυτή την περιοχή συχνοτήτων κυμαίνεται από 0,00001 μέχρι 0,00002.

### 1.1.12 Φυσικές και συνθετικές ίνες και υφάσματα

Τόσο οι φυσικές και συνθετικές ίνες όσο και τα υφάσματα χρησιμοποιούνται για σκοπούς μόνωσης. Πολλά υφάσματα έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, είναι ανθεκτικά και εύκαμπτα. Οι ιδιότητες τους ποικίλουν ανάλογα με τη σύνθεσή τους και επηρεάζονται αρκετά από το περιβάλλον. Όταν αυτά είναι τελείως ξηρά, η διηλεκτρική τους σταθερά ισούνται περίπου με 2 για περιοχή συχνοτήτων από  $10^2$  ως  $10^7$  Hz. Όταν αυτά τα υλικά υπόκεινται σε συνθήκες υψηλής υγρασίας, η διηλεκτρική τους σταθερά μεταβάλλεται με την υγρασία ως εξής :

Στην πιο πάνω κλίμακα συχνοτήτων, ξεκινώντας από τα 100Hz, η διηλεκτρική σταθερά έχει τιμή από 5 ως 7 και σταδιακά μειώνεται στα 2. Επιπρόσθετα, ο συντελεστής απωλειών παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά και κυμαίνεται μεταξύ 0,003 και 0,02 για ξηρά υφάσματα, στην περιοχή των πιο πάνω συχνοτήτων. Επίσης ο συντελεστής απωλειών για συνθήκες υψηλής υγρασίας γενικά μειώνεται με τη συχνότητα. Με την αύξηση όμως της περιεκτικότητας νερού για μια δοσμένη συχνότητα, τόσο η διηλεκτρική σταθερά, όσο και ο συντελεστής απωλειών αυξάνονται.

Ο μηχανισμός ηλεκτρικής αγωγιμότητας στις υγροαπορροφητικές ίνες φαίνεται να είναι αποτέλεσμα των ιόντων που είναι διαλυμένα στην υγρασία. Η ειδική αντίσταση των ξηρών ινών βρίσκεται στην περιοχή από  $10^{11}$  Ω.cm ως  $10^{14}$  Ω.cm. Η διάσπαση του διηλεκτρικού γίνεται για τιμές πεδίου 300 ως 700V/mil.

Πιο λεπτομερή δεδομένα για την εφαπτομένη των απωλειών, τη διηλεκτρική σταθερά και τη διηλεκτρική αντοχή και διάφορων μονωτικών υλικών δίνονται στους πίνακες που ακολουθούν.

Υλικό	$\tan\delta$
Πολυστυρένιο	2,5
Πολυεστέρας	3,2
Μίκα	6,9
Ανοδιωμένο στρώμα αλουμινίου	8,5
Πολυκρυσταλλικό $\text{TiO}_2$	90
X7K ( Κεραμικό)	1800

**Πίνακας 1.1.12-1** : Ενδεικτικές τιμές εφαπτομένης απωλειών ( $\tan\delta$ ) στα 60Hz

Υλικό	Θερμοκρασία (°C)	$\epsilon_r$ ( $f=10^3$ Hz)	$\epsilon_r$ ( $f=10^6$ Hz)	$\epsilon_r$ ( $f=10^9$ Hz)
Φαινολική φορμαλδεΐδη	25-27	5,15-8,61	4,45-5,05	4,1-4,5
	57	6,35	4,90	4,5
	88	8,5	5,2	4,7
Μελαμινική φορμαλδεΐδη	24-28	6,0-6,90	5,82-6,20	5,5-5,55
	57	6,95	5,40	4,90
	88	11,8	6,0	5,5
Nylon 66	25	3,75	3,33	3,16
Οξική κυτταρίνη Cellulose acetate	26	3,50-4,48	3,28-3,90	3,05-3,40
Πυριτικές ρητίνες	25	3,79-3,91	3,79-3,82	3,82
Πολυαιθυλένιο	23	2,26	2,26	2,26
Βινυλίτης VU	24	5,65	3,30	2,80
Χλωριούχο πολυβινύλιο(PVC)	25	4,55( $10^4$ )	3,3	-
Λουσίτης	23	2,84	2,63	2,50
Plexiglas	27	3,12	2,76	-
Πολυστυρένιο	25	2,54-2,56	2,54-2,56	-
Hevea, βουλκανισμένο	27	2,94	2,74	2,46
Hevea, σύνθετο	27	36	9	6,8
Buna S	20	2,66	2,56	2,52
Νεοπρένιο	24	6,60	6,26	4,5
Πυριτικά ελαστικά	25	3,12-3,30	3,10-3,20	3,06-3,18

**Πίνακας 1.1.12-2:** Διηλεκτρική σταθερά διάφορων πλαστικών και ελαστικών

Υλικό	$\epsilon_r$ (f=10 <sup>4</sup> Hz)	Διηλεκτρική αντοχή(V/mil)
Αλουμίνα	4,5-8,4	40-160
Κορδερίτης	4,5-8,4	40-250
Φωστερίτης	6,2	240
Πορσελάνη(ξηρής διεργασίας)	6,0-8,0	40-240
Πορσελάνη (υγρής διεργασίας)	6,0-7,0	90-400
Πορσελάνη, ζirkονίου	7,1-10,5	250-400
Στεατίτης	5,5-7,5	200-400
Τιτανίτες(Ba,Sr,Ca,Mg and Pb)	15-12000	50-300
Διοξείδιο τιτανίου	14-110	100-210

**Πίνακας 1.1.12-4:** Διηλεκτρική σταθερά και διηλεκτρική αντοχή διάφορων κεραμικών υλικών

Διηλεκτρικό μέσο	Διηλεκτρική αντοχή
Ατμόσφαιρα σε πίεση 1atm	31,7kV/cm στα 60Hz
Αέριο SF6	79,3kV/cm στα 60Hz
Πολυβουτάνιο	>138kV/cm στα 60Hz
Λάδι μετασχηματιστή	128kV/cm στα 60Hz
Άμορφο οξείδιο του πυριτίου που χρησιμοποιείται στην τεχνολογία MOS	10MV/cm dc
Βοριούχο πυριτικό γυαλί	10MV/cm για διάρκεια 10μs, 6MV/cm για διάρκεια 30μs
Πολυπροπυλένιο	295-314 kV/cm

**Πίνακας 1.1.12-4:** Ενδεικτικές τιμές διηλεκτρικής αντοχής σε θερμοκρασία δωματίου και πίεση 1atm

## **1.2 Οι φορείς στα μονωτικά υλικά**

Στη χημική τους σύσταση, οι μονωτές είναι σώματα ιοντικής, ομοιοπολικής ή μοριακής κατασκευής. Καθώς τα ιόντα των σωμάτων αυτών είναι δυσκίνητα, είτε εξαιτίας του ότι η ισχύς των ομοιοπολικών δεσμών είναι μεγάλη, είτε εξαιτίας του ότι τα μόρια τους είναι σταθερά, δηλαδή δεν διασπώνται εύκολα σε φορτισμένες ρίζες, δεν υπάρχουν στα παραπάνω

σώματα ευκίνητοι φορείς σε σημαντική ποσότητα και έτσι δεν έχουν τη δυνατότητα εκδήλωσης ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Παρόλα αυτά είναι πρακτικά αναπόφευκτη η ύπαρξη σε κάθε σώμα προσμίξεων, ακαθαρσιών, διεγέρσεων και διασπάσεων που δημιουργούν ένα μικρό αριθμό φορέων ηλεκτρικού ρεύματος. Γενικά, κανένα σώμα δεν αποτελείται αποκλειστικά από τη σύσταση που του αποδίδεται θεωρητικά. Π.χ. ο ατμοσφαιρικός αέρας, που θεωρούμε ότι αποτελείται από ουδέτερα μόρια αζώτου, οξυγόνου, υδρατμών, διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων και επομένως θα έπρεπε να είναι ένας τέλειος μονωτής, εκδηλώνει στην πραγματικότητα μια μικρή ηλεκτρική αγωγιμότητα εξαιτίας κυρίως των λίγων θετικών και αρνητικών μοριακών ιόντων αζώτου ( $N_2^+$  και  $N_2^-$ ) που δημιουργούνται από την επίδραση της κοσμικής ακτινοβολίας.

Ειδικότερα για τα ομοιοπολικά στερεά, ως μονωτικά σώματα συμπεριφέρονται εκείνα που έχουν ενεργειακό διάκενο μεγαλύτερο από 2,5eV περίπου. Εφαρμόζοντας τη συνάρτηση Fermi σε ένα τέτοιο σώμα με ενεργειακό διάκενο  $E_g = 2,4\text{eV}$  και υποθέτοντας ότι η στάθμη Fermi βρίσκεται στο μέσο της απαγορευμένης ζώνης, συμπεραίνουμε ότι η πιθανότητα δημιουργίας ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών στη συνηθισμένη θερμοκρασία περιβάλλοντος (πχ  $20^\circ\text{C}$ ) είναι :

$$P(E) = e^{(-E_g / 2kT)} = \exp(-2 / 2 \cdot 8,63 \cdot 10^{-5} \cdot 293) = 3,4 \cdot 10^{-22} \quad (1.2-1)$$

που είναι πρακτικά μηδενική.

Το ρεύμα που δημιουργεί η επιφανειακή αγωγιμότητα των στερεών μονωτικών υλικών ονομάζεται ρεύμα ερπυσμού διότι έρπει, δηλαδή σέρνεται πάνω στην επιφάνειά τους. Τα ρεύματα ερπυσμού είναι σχετικά σταθερά όταν οι συνθήκες δεν μεταβάλλονται. Η κατανομή όμως της πυκνότητας των ρευμάτων αυτών δεν είναι ομοιόμορφη διότι οι φορείς τους ακολουθούν κατά προτίμηση ορισμένους αγωγίμους δρόμους διαρροής στην επιφάνειας ή σε ρωγμές των σωμάτων.

### **1.3 Δύναμη μεταξύ φορτίων - Η διηλεκτρική σταθερά**

Η εκδήλωση δυνάμεων έλξης ή απώθησης  $F$  μεταξύ δύο ηλεκτρικών φορτίων σε κατάσταση ηρεμίας εξαρτάται από το μέγεθος και το είδος των φορτίων, από την μεταξύ τους απόσταση  $r$  και από τις ιδιότητες του διηλεκτρικού μέσου, δηλαδή του χώρου που μεταδίδονται οι ηλεκτρικές δυνάμεις. Σύμφωνα με το νόμο του Coulomb ισχύει :

$$F = k \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad (1.3-1)$$

Η τιμή της σταθεράς  $k$ , όταν το διηλεκτρικό μέσο είναι το κενό είναι  $k = 8,988 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 \text{ C}^{-2}$  και η διηλεκτρική σταθερά του κενού ορίζεται ως :

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = \frac{1}{4\pi \cdot 8,988 \cdot 10^9} = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2} \quad (\text{AsV}^{-1} \text{ m}^{-1}) \quad (1.3-2)$$

Αν αντί τον κενό χώρο παρεμβάλλεται υλικό μεταξύ των φορτίων, η εξασκούμενη δύναμη μειώνεται κατά ένα ποσοστό που εξαρτάται από τις ιδιότητες του σώματος που δρα ως διηλεκτρικό μέσο. Τότε :

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad (1.3-3)$$

Το  $\epsilon$  είναι η απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού και δίνεται από τη συσχέτιση της διηλεκτρικής σταθεράς του σώματος με αυτή του κενού. Δηλαδή:

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \quad \text{όπου } \epsilon_r \text{ η σχετική διηλεκτρική σταθερά (για το κενό } \epsilon_r = 1)$$

Τελικά ο νόμος του Coulomb γράφεται :

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_r \cdot \epsilon_0} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad (1.3-4)$$

#### **1.4 Χωρητικότητα μονωτών**

Όταν μια τάση εφαρμοστεί σε δύο παράλληλες αγωγίμες πλάκες που χωρίζονται με απόσταση  $L$  μεταξύ τους, τότε αυτές τότε αυτές θα παραμείνουν φορτισμένες ακόμα και αν η τάση σταματήσει να εφαρμόζεται. Η ικανότητα αυτή, αποθήκευσης ενέργειας καλείται χωρητικότητα και συμβολίζεται με  $C$ . Ισούται με το φορτίο  $q$  το οποίο φορτίζεται η κάθε πλάκα οπλισμού προς την τάση  $V$  μεταξύ των δύο πλακών:

$$C = \frac{q}{V} \quad \text{σε Farad.} \quad (1.4-1)$$

Αν υποθέσουμε ότι η επιφάνεια της κάθε πλάκας είναι  $A$ , ότι η επιφανειακή πυκνότητα του φορτίου είναι  $D$  και δεδομένης της απόστασης  $L$  μεταξύ των πλακών έχουμε :



$$q = D.A = \varepsilon.E.A = \frac{\varepsilon.V.A}{L} \quad (1.4-2)$$

$$\Rightarrow C = \frac{q}{V} = \frac{\varepsilon.A}{L} = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_o \frac{A}{L} \quad (1.4-3)$$

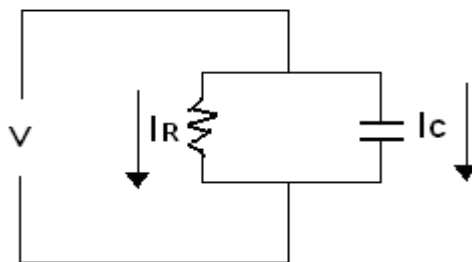
$$\text{Και αφού } C_o = \varepsilon_o \frac{A}{L} \text{ τότε : } \varepsilon_r = \frac{C}{C_o} \quad (1.4-4)$$

Έτσι, παρατηρούμε ότι η σχετική διηλεκτρική σταθερά δείχνει κατά πόσο η χωρητικότητα του διηλεκτρικού είναι μεγαλύτερη από τη χωρητικότητα του κενού ή του αέρα. Συνεπώς αποτελεί ένδειξη για το πόση ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί στο υλικό από το επιβαλλόμενο πεδίο.

### 1.5 Ο Συντελεστής απωλειών (tanδ)

Σε μία μόνωση, που παρεμβάλλεται μεταξύ ηλεκτροδίων με σκοπό τη δημιουργία ενός ηλεκτροστατικού πεδίου, υπάρχουν πάντοτε απώλειες ενέργειας. Έτσι, ο μονωτής έχει, εκτός από το χωρητικό ρεύμα  $I_C$  και ένα ρεύμα διαρροής  $I_R$ . Στην πράξη το ρεύμα διαρροής αυξάνει, γιατί η αγωγιμότητα του μονωτή γίνεται μεγαλύτερη, όπως συμβαίνει π.χ. κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων, και τη θερμική καταπόνηση του μονωτή από τις απώλειες των αγωγών.

Στο σχήμα δίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή  $C$  με ομοιογενές διηλεκτρικό και απώλειες (λόγω της αγωγιμότητάς του  $G$ ).



**Σχήμα 1.5-1 :** Ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή  $C$  με απώλειες λόγω της αγωγιμότητας  $G$  του διηλεκτρικού του

Ο συντελεστής απωλειών δίνεται από τον τύπο 1.5-1 :

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{G}{\omega C} \quad (1.5-$$

1)

και είναι ένα κριτήριο αξιολόγησης του διηλεκτρικού (ή μίας μονωτικής διάταξης γενικότερα), γιατί δίνει πληροφορίες για την αγωγιμότητά του.

Σε ένα πυκνωτή που το διηλεκτρικό μέσο είναι ένα μονωτικό υλικό, η τιμή της εφαπτομένης απωλειών ισούται με το λόγο της ενέργειας που απορροφάται από το πεδίο προς την ενέργεια που αποθηκεύεται και ανακτάται από τους οπλισμούς του πυκνωτή σε κάθε περίοδο. Ο συντελεστής απωλειών εξαρτάται από τη συχνότητα και μεγιστοποιείται πέρα από μια συχνότητα  $\omega=1/\tau$ , που εξαρτάται από το υλικό. Τέλος, ο συντελεστής απωλειών αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της θερμοκρασίας.

### 1.6 Απώλειες ενέργειας του διηλεκτρικού

Όταν τα μονωτικά υλικά βρίσκονται κάτω από την επίδραση ηλεκτρικών πεδίων, αναπτύσσονται διάφοροι μηχανισμοί οι οποίοι απορροφούν ενέργεια από τα πεδία. Δηλαδή έχουμε ανεπιθύμητη απώλεια ενέργειας. Το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα δυσάρεστο, διότι η ενέργεια που απορροφάται στα υλικά μετατρέπεται κυρίως σε θερμότητα, η οποία αν δεν απορροφηθεί από το περιβάλλον με αρκετά ταχύ ρυθμό προκαλεί την αύξηση της θερμοκρασίας με αποτέλεσμα την κακή λειτουργία, τις βλάβες και την πρόωρη καταστροφή των ηλεκτροτεχνικών διατάξεων.

Στα συνεχή πεδία, η απορρόφηση ενέργειας στο υλικό οφείλεται στη δημιουργία ρεύματος διαρροής στο μονωτικό, εξαιτίας της αγωγιμότητας όγκου ή και της επιφανειακής του αγωγιμότητας.

Στα εναλλασσόμενα πεδία, οι απώλειες ενέργειας οφείλονται :

- α) στην κατανάλωση ενέργειας κατά τη διαρκή εναλλαγή της φοράς της ηλεκτρικής ροπής των δίπολων στο ρυθμό της εναλλαγής της πολικότητας της εναλλασσόμενης τάσης, και
- β) στην πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, που έχουν τα μονωτικά υλικά..

Σε αυτήν την περίπτωση, οι απώλειες ισχύος Joule ισούνται με

$$P = I_r \cdot U = GU^2 = \omega C \cdot U^2 \cdot \tan \delta \quad \left( \tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{G}{\omega C} \right) \quad (1.6-1)$$

Για πυκνωτή επίπεδων πλακών όπου  $C = \epsilon_o \epsilon_r \frac{A}{d}$  η σχέση (1.6-1) γράφεται :

$$P = \omega \cdot \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} U^2 \cdot \tan \delta \quad (1.6-2)$$

Πολλαπλασιάζοντας και διαιρώντας με d :

$$P = \omega \cdot \epsilon_0 \epsilon_r A d \cdot \frac{U^2}{d^2} \cdot \tan \delta \quad (1.6-3)$$

Όμως A.d είναι ο όγκος του υλικού και U/d η μέγιστη πεδιακή ένταση  $E_m$  .

Έτσι η σχέση (1.6-3) γίνεται

$$P = \omega \cdot \epsilon_0 \epsilon_r V \cdot E_m^2 \cdot \tan \delta \quad (1.6-4)$$

Επομένως οι απώλειες ενέργειας του διηλεκτρικού ανά μονάδα όγκου είναι :

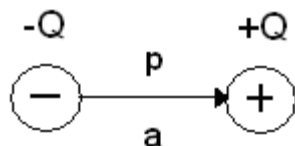
$$W_{\text{όγκου}} = \frac{P}{V} = \omega \cdot \epsilon_0 \epsilon_r \cdot E_m^2 \cdot \tan \delta \quad (1.6-5)$$

## 1.7 Πόλωση υλικών

### 1.7.1 Ο ορισμός του διανύσματος πόλωσης

Μια ηλεκτρική διπολική ροπή είναι απλά ο συνδυασμός ενός θετικού φορτίου +Q και ενός ίσου σε μέτρο αρνητικού φορτίου -Q, σαν αυτά που φαίνονται στο σχήμα 1.7. Αν  $\mathbf{a}$  είναι το διάνυσμα από το αρνητικό στο θετικό φορτίο, τότε η ηλεκτρική διπολική ροπή ορίζεται διανυσματικά :

$$\mathbf{p} = Q \cdot \mathbf{a} \quad (1.7.1-1)$$

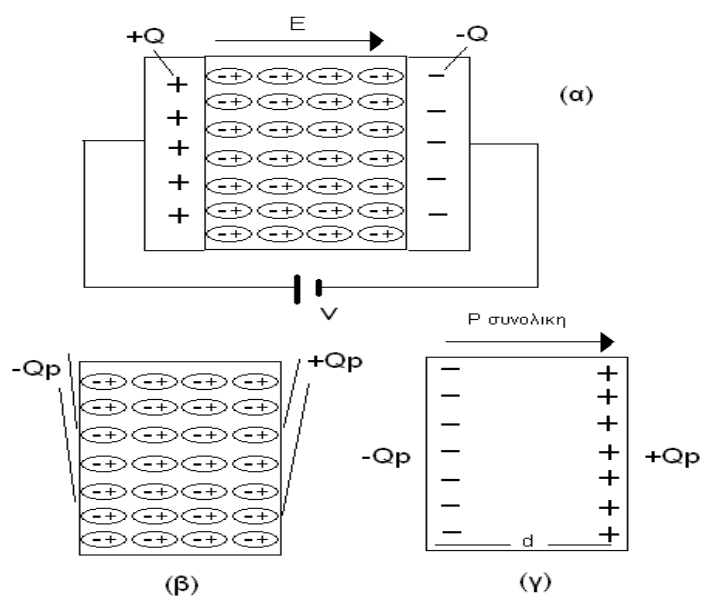


**Σχήμα 1.7.1-1** : Το διάνυσμα της διπολικής ροπής

Το συνολικό φορτίο της περιοχής που περιέχει τα φορτία +Q και -Q είναι μηδέν.

Όταν ένα υλικό βρίσκεται εντός ενός ηλεκτρικού πεδίου, τότε τα άτομα και τα μόρια του υλικού πολώνονται και δημιουργείται μια κατανομή διπολικών ροπών στο υλικό. Στο σχήμα

1.7.1-2 απεικονίζεται το φαινόμενο αυτό. Στο σχήμα 1.7.1-2α βλέπουμε τι συμβαίνει όταν εισάγουμε σε έναν πυκνωτή παράλληλων πλακών μια διηλεκτρική πλάκα. Η τοποθέτηση της διηλεκτρικής πλάκας εντός του ηλεκτρικού πεδίου πολώνει τα μόρια του υλικού. Όλες οι επαγόμενες διπολικές ροπές έχουν φορά προς την κατεύθυνση του πεδίου. Ας εξετάσουμε το πολωμένο μέσο μόνο του, όπως αυτό που φαίνεται στο σχήμα 1.7.1-2β. Στο κύριο σώμα του υλικού, τα δίπολα είναι ευθυγραμμισμένα και ο θετικός πόλος του ενός εφάπτεται με τον αρνητικό πόλο του άλλου. Το συνολικό φορτίο του κύριου σώματος του υλικού είναι μηδέν. Τα θετικά όμως φορτία που βρίσκονται στη δεξιά άκρη δεν εξουδετερώνονται από κανένα αρνητικό φορτίο στην περιοχή αυτή. Θα υπάρχει επομένως στην δεξιά πλευρά του διηλεκτρικού ένα επιφανειακό φορτίο  $+Q_p$ , το οποίο προέκυψε από την πόλωση του υλικού. Αντίστοιχα, στην αριστερή πλευρά του υλικού θα υπάρχει ένα ίσου μέτρου αρνητικό φορτίο  $-Q_p$  που οφείλεται στην παρουσία των αρνητικών φορτίων των διπόλων. Στο σχήμα 1.7.1-2γ φαίνονται τα φορτία  $+Q_p$  και  $-Q_p$  που εμφανίζονται στις 2 πλευρές του υλικού όταν αυτό πολώνεται από ένα ηλεκτρικό πεδίο. Τα φορτία αυτά είναι δεσμευμένα και είναι το άμεσο αποτέλεσμα της πόλωσης των μορίων και ονομάζονται επιφανειακά φορτία πόλωσης.



**Σχήμα 1.7.1-2 :** Πόλωση διηλεκτρικού υλικού όταν βρεθεί εντός ηλεκτρικού πεδίου

- (α) Όταν τοποθετούμε ένα διηλεκτρικό εντός ενός ηλεκτρικού πεδίου, τότε στις δύο επιφάνειες εμφανίζονται δεσμευμένα φορτία πόλωσης.
- (β) Η προέλευση των φορτίων πόλωσης είναι η πόλωση των μορίων του μέσου.
- (γ) Μπορούμε να αναπαραστήσουμε ολόκληρο το διηλεκτρικό συναρτήσει των επιφανειακών φορτίων πόλωσης  $+Q_p$  και  $-Q_p$ .

Αναπαριστούμε την πόλωση ενός μέσου με την ποσότητα που ονομάζεται πόλωση και συμβολίζεται με  $P$ . Το διάνυσμα της πόλωσης ορίζεται ως η συνολική διπολική ροπή ανά μονάδα όγκου:

$$P = \frac{1}{\text{όγκος}} (p_1 + p_2 + \dots + p_N) \quad (1.7.1-2)$$

,όπου  $p_1, p_2, \dots, p_N$  οι διπολικές ροπές που επάγονται στα  $N$  μόρια του συγκεκριμένου όγκου. Αν  $p_{\text{μέση}}$  είναι η μέση διπολική ροπή ανά μόριο, τότε ένας ισοδύναμος ορισμός της  $P$  είναι:

$$P = N \cdot p_{\text{μέση}} \quad (1.7.1-3)$$

,όπου  $N$  το πλήθος των μορίων ανά μονάδα όγκου.

Όταν η πόλωση δημιουργείται λόγω της επίδρασης του πεδίου, τότε η  $p_{\text{μέση}}$  θα είναι η μέση διπολική ροπή ανά μόριο, στην κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου πεδίου. Στην περίπτωση αυτή η  $p_{\text{μέση}}$  γράφεται και ως μέση επαγόμενη διπολική ανά μόριο, δηλαδή  $p_{\text{επαγόμενη}}$ .

Για να υπολογίσουμε την πόλωση του Σχ.2, πρέπει να αθροίσουμε όλα τα δίπολα του μέσου και να διαιρέσουμε δια του όγκου  $A \cdot d$  ( $A$  η επιφάνεια που δεν φαίνεται στο σχήμα). Όμως το πολωμένο μέσο μπορεί να αναπαρασταθεί και όπως το Σχ.3, δηλαδή συναρτήσει των επιφανειακών φορτίων  $+Q_p$  και  $-Q_p$  που απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $d$ . Αν θεωρήσουμε αυτήν τη διάταξη διπολική, η διάταξη είναι μια ροπή  $p_{\text{συνολική}}$  από το  $+Q_p$  στο  $-Q_p$ .

Επομένως :

$$p_{\text{συνολική}} = Q_p \cdot d \quad (1.7.1-4)$$

Και αφού η πόλωση ορίζεται ως η συνολική ροπή ανά μονάδα όγκου, τότε :

$$P = \frac{p_{\text{συνολική}}}{\text{όγκος}} = \frac{Q_p \cdot d}{A \cdot d} = \frac{Q_p}{A} \quad (1.7.1-5)$$

Ο λόγος  $\frac{Q_p}{A}$  ισούται με την πυκνότητα των επιφανειακών φορτίων πόλωσης  $\sigma_p$ .

$$\text{Επομένως, } P = \sigma_p \quad (1.7.1-6)$$

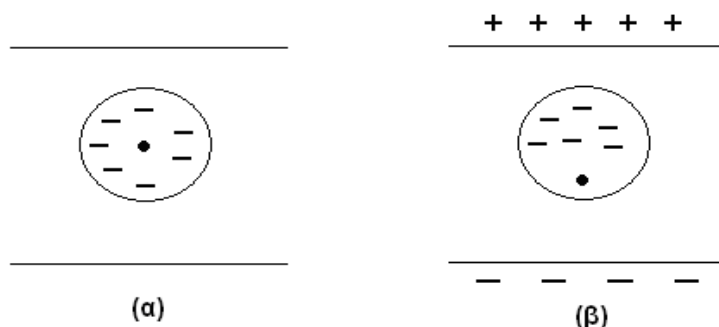
### 1.7.2 Μηχανισμοί πόλωσης

Οι κυριότεροι μηχανισμοί πόλωσης, ανάλογα με το είδος των δεσμευμένων φορτίων (ηλεκτρόνια, πυρήνες ατόμων, ιόντα, πόλοι πολικών μορίων) που μετατοπίζονται με την επίδραση ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Ειδικότερα, οι μηχανισμοί αυτοί είναι οι παρακάτω :

#### 1.7.2.1 Ηλεκτρονική πόλωση

Τα ηλεκτρόνια των ατόμων μετατοπίζονται ως προς τους πυρήνες τους. Παραμορφώνονται, δηλαδή οι ηλεκτρονικές στιβάδες των ατόμων και παύουν να συμπίπτουν τα κέντρα βάρους των αρνητικών και των θετικών φορτίων τους. Καθώς τα ηλεκτρόνια είναι πολύ ελαφρά, η αντίδραση τους στο επιβαλλόμενο πεδίο είναι ταχύτατη. Ο χρόνος που απαιτείται για την πραγματοποίηση της παραμόρφωσης είναι συνήθως πολύ μικρός, της τάξης των  $10^{-14}$ s για τα ηλεκτρόνια σθένους και της τάξης των  $10^{-19}$ s για τα λιγότερο ενεργά ηλεκτρόνια των εσωτερικών στιβάδων των ατόμων.

Ο μηχανισμός αυτός φαίνεται παραστατικά στο σχήμα 1.7.2.1-1( η κουκκίδα παριστάνει το θετικό πυρήνα που περιβάλλεται από το ηλεκτρονιακό νέφος του ατόμου) :



**Σχήμα 1.7.2.1-1 :** Ηλεκτρονική πόλωση ενός ατόμου

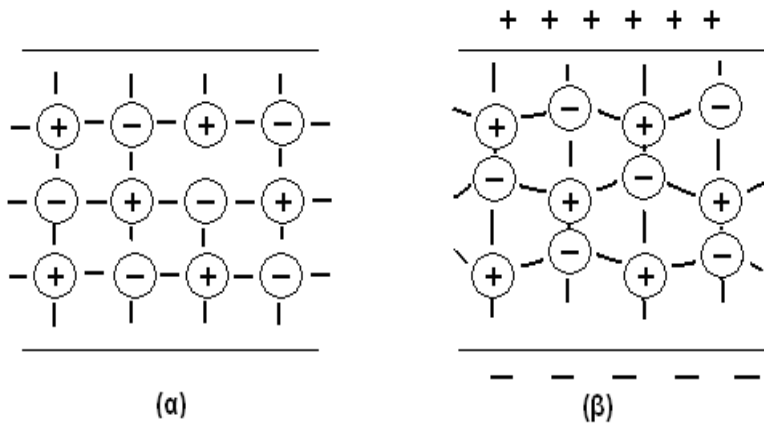
(α)Χωρίς την επιβολή εξωτερικού πεδίου

(β)Μετά από την επιβολή εξωτερικού πεδίου

#### 1.7.2.2 Ατομική πόλωση

Στην ατομική πόλωση μεταβάλλονται τα μήκη ή οι γωνίες των δεσμών στα κρυσταλλικά πλέγματα και στα μόρια, με αποτέλεσμα να δημιουργείται διπολική ροπή ή να αυξάνεται η τιμή της, αν προϋπήρχε διπολική ροπή λόγω της κατασκευής του σώματος. Η ατομική πόλωση πραγματοποιείται με σχετικά μεγάλη ταχύτητα, μικρότερη όμως από την ηλεκτρονική πόλωση, αφού τα άτομα έχουν πολύ μεγαλύτερη μάζα από τα ηλεκτρόνια. Συγκεκριμένα, ο απαιτούμενος χρόνος είναι της τάξης των  $10^{-13}$ s. Η ατομική πόλωση, όπως

άλλωστε και η ηλεκτρονιακή πόλωση, αποτελεί ελαστική παραμόρφωση και δεν απορροφά ενέργεια κατά την πραγματοποίηση και κατά την επαναφορά τους στην κανονική κατάσταση, ύστερα από την απομάκρυνση της επίδρασης του εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Η ατομική πόλωση ενός κρυσταλλικού πλέγματος φαίνεται σχήμα 1.7.2.2-1.



**Σχήμα 1.7.2.2-1 :** Ατομική πόλωση ενός κρυσταλλικού πλέγματος

(α) Χωρίς την επιβολή εξωτερικού πεδίου

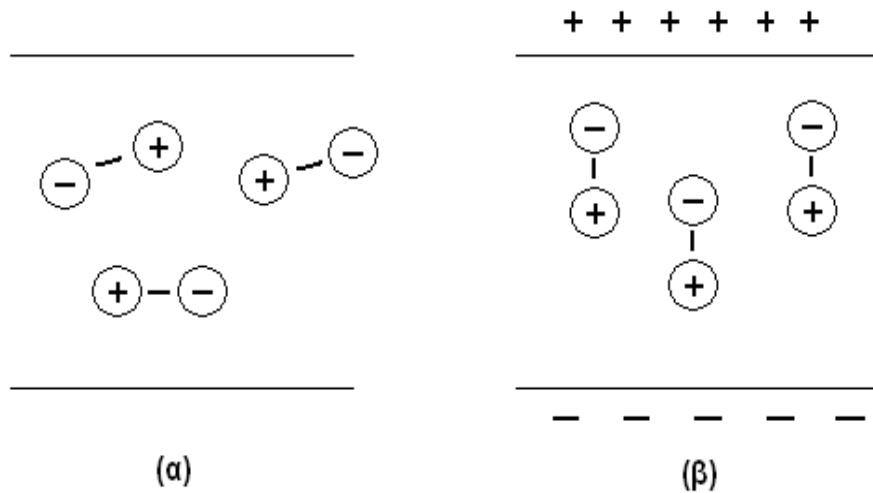
(β) Μετά από την επιβολή εξωτερικού πεδίου

### 1.7.2.3 Πόλωση προσανατολισμού

Με την επίδραση του εξωτερικού πεδίου, τα σώματα που αποτελούνται από πολικά μόρια, με μόνιμη διπολική ροπή, πολώνονται παραπέρα με δύο κυρίως μηχανισμούς. Αφενός μετατοπίζονται τα άτομα του κάθε μορίου, απομακρύνονται μεταξύ τους και αυξάνουν έτσι τη διπολική ροπή του μορίου. Πραγματοποιείται δηλαδή μια ατομική πόλωση. Αφετέρου εκδηλώνεται η πόλωση προσανατολισμού. Δηλαδή όταν δεν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο, τα δίπολα έχουν τυχαία κατανομή στις κατευθύνσεις των διπολικών ροπών του, με αποτέλεσμα αυτές να αντισταθμίζονται και η συνολική ροπή από τα δίπολα να μηδενίζεται. Όταν όμως εφαρμοστεί ένα πεδίο, οι διπολικές ροπές όλων των διπόλων τείνουν να προσανατολιστούν παράλληλα προς το πεδίο και η συνιστώσα τους αποκτά μια τιμή ανάλογη προς το πεδίο. Το φαινόμενο πραγματοποιείται με αρκετή ελευθερία στα αέρια και στα υγρά μικρού ιξώδους. Στα ιξώδη (παχύρρευστα) όμως υγρά και στα στερεά εξελίσσεται με αργό σχετικά ρυθμό, διότι η μεταβολή της κατεύθυνσης των μορίων συνεπάγεται μετατοπίσεις ατόμων και περιστροφές μορίων που παρεμποδίζονται από γειτονικά μόρια. Εξίσου αργά εξελίσσεται και η επαναφορά των διπόλων στην κανονική τους κατανομή κατευθύνσεων, ύστερα από την απομάκρυνση του πεδίου. Ο χρόνος που απαιτείται για να μειωθεί η πόλωση προσανατολισμού στο  $1/e$  ( $\approx 0,368$ ) της τιμής της, από τη χρονική

στιγμή απομάκρυνσης του πεδίου, ονομάζεται χρόνος χαλάρωσης ( $\tau$ ) των διπόλων του σώματος. Δηλαδή, ο χρόνος  $\tau$  είναι ένα μέτρο του χρόνου που χρειάζονται τα δίπολα μόρια για να αποκτήσουν και πάλι την τυχαία κατανομή των διευθύνσεών τους, με την επίδραση της θερμικής ενέργειας του περιβάλλοντος.

Στο σχήμα 1.7.2.3-1 φαίνεται ενδεικτικά η πόλωση προσανατολισμού δίπολων μορίων :



**Σχήμα 1.7.2.3-1 :** Πόλωση προσανατολισμού διπόλων μορίων

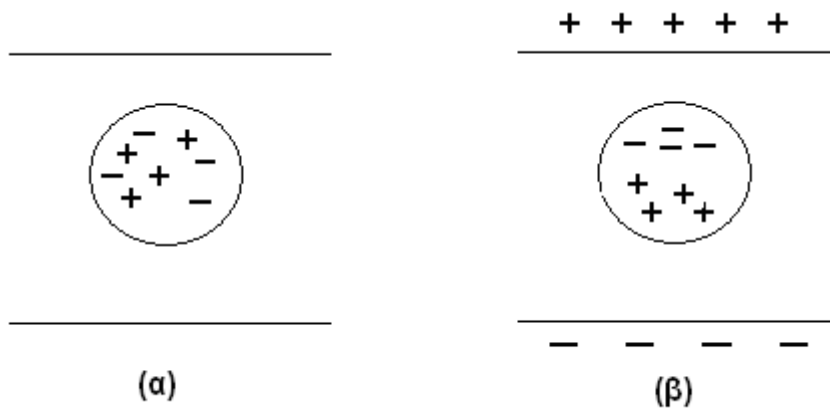
(α) Χωρίς την επιβολή εξωτερικού πεδίου

(β) Μετά από την επιβολή εξωτερικού πεδίου

#### 1.7.2.4 Πόλωση χωρικών φορτίων

Κατά την πόλωση των φορτίων χώρου (χωρικά φορτία), μετακινούνται τα διάσπαρτα φορτία (ιόντα, ρίζες), που έχουν δημιουργηθεί στο χώρο των στερεών μονωτικών από διάφορες επιδράσεις, όπως οι προσμίξεις, η θερμική διέγερση, η κοσμική ακτινοβολία κλπ. Τα φορτία αυτά παγιδεύονται κατά τη μετακίνησή τους υπό την επίδραση του πεδίου, σε περιοχές ή επιφάνειες που εμποδίζουν την παραπέρα πορεία τους και προσδίδουν τελικά στο σώμα διπολική ροπή. Στο σχήμα 1.7.2.4-1 φαίνεται παραστατικά η πόλωση χωρικών φορτίων :





**Σχήμα 1.7.2.3-1** : Πόλωση χωρικών φορτίων

(α) Χωρίς την επιβολή εξωτερικού πεδίου

(β) Μετά από την επιβολή εξωτερικού πεδίου

Η πραγματοποίηση της μετακίνησης των χωρικών φορτίων, όπως και του προσανατολισμού των διπόλων, υπό την επίδραση του πεδίου, προϋποθέτει την υπερνίκηση της αντίστασης των γειτονικών μορίων και ατόμων. Η διεργασία αυτή απαιτεί την απορρόφηση ενέργειας. Έτσι σε αντίθεση με την ηλεκτρονιακή και την ατομική πόλωση, οι πολώσεις προσανατολισμού και χωρικών φορτίων συνοδεύονται από απώλεια ποσότητας ενέργειας από το πεδίο, που απορροφάται από το σώμα που παθαίνει την πόλωση και προκαλεί την αύξηση της θερμοκρασίας του.

### **1.8 Διηλεκτρική αντοχή και διάσπαση μόνωσης στερεών υλικών**

Η τάση που ασκείται σε ένα διηλεκτρικό, επομένως και το πεδίο στο εσωτερικό του δεν μπορεί να αυξάνεται απεριόριστα. Μόλις η τάση φτάσει σε κάποιο επίπεδο, διαφορετικό για το κάθε υλικό, τότε συμβαίνει η διάσπαση του διηλεκτρικού. Η διηλεκτρική αντοχή  $E_{br}$  είναι το μέγιστο πεδίο το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα μονωτικό μέσο χωρίς να προκαλέσει διάσπαση. Αν το εφαρμοζόμενο πεδίο γίνει μεγαλύτερο από τη διηλεκτρική αντοχή του υλικού, τότε έχουμε διάσπαση του διηλεκτρικού. Η διηλεκτρική αντοχή των στερεών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες πέραν της μοριακής δομής του υλικού. Εξαρτάται από τις προσμίξεις του υλικού, τις ατέλειες της μικροδομής (π.χ. μικροκενά), τη γεωμετρία του δείγματος, τη φύση των ηλεκτροδίων, τη θερμοκρασία, τις συνθήκες του περιβάλλοντος (π.χ. υγρασία), καθώς και από τη διάρκεια εφαρμογής και τη συχνότητα του εφαρμοζόμενου πεδίου. Η διηλεκτρική αντοχή είναι διαφορετική ανάλογα με τη μορφή της εφαρμοζόμενης τάσης (Dc, ac, κρουστική). Υπάρχουν επίσης φαινόμενα γήρανσης, τα

οποία προκαλούν προοδευτική υποβάθμιση των ιδιοτήτων του μονωτή και μειώνουν σταδιακά τη διηλεκτρική αντοχή. Για τους μηχανικούς που ασχολούνται με την ηλεκτρική μόνωση, το ζήτημα της διηλεκτρικής αντοχής είναι μια από τις πιο δύσκολες στην ερμηνεία και τη χρήση παραμέτρους. Το πεδίο διάσπασης εξαρτάται για παράδειγμα επίσης από το πάχος του υλικού. Αυτό εξηγείται με βάση το ότι ένα παχύτερο μονωτικό στρώμα έχει περισσότερο όγκο και υπάρχει επομένως, μεγαλύτερη πιθανότητα να περιέχει κάποια ατέλεια μικροδομής (π.χ. μια μικροκοιλότητα), από την οποία μπορεί να ξεκινήσει η διάσπαση του υλικού.

### **1.9 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών**

Τα στερεά ηλεκτρομονωτικά υλικά λόγω της μεγάλης σταθερότητας των μορίων τους δεν έχουν τη δυνατότητα όπως τα υγρά και τα αέρια να επανέρχονται εύκολα στη αρχική τους κατάσταση. Στα στερεά μονωτικά, η ικανότητα δημιουργίας ιόντων είναι κατά πολύ μικρότερη και η διάτρηση έχει σαν αποτέλεσμα κάποια μόνιμη βλάβη σ' αυτά (κάψιμο, τήξη, μηχανικές κακώσεις, κτλ). Επίσης τα φαινόμενα που εκδηλώνονται προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών, καθώς και εκείνα κατά την επιφανειακή διάσπαση ή την υπερπήδηση, προκαλούν συνήθως μόνιμες βλάβες σε βάρος της διηλεκτρικής αντοχής των στερεών διηλεκτρικών.

Από τις διάφορες έρευνες που έχουν γίνει, για τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών, μπορεί κανείς να ομαδοποιήσει τις μεθόδους που εφαρμόζονται σε δύο βασικές θεωρίες:

- Τη μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών
- Τη κβαντομηχανική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών.

Σύμφωνα με τη μακροσκοπική θεωρία τα αποτελέσματα των ερευνών βασίζονται σε κάποιο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο πηγάζει από το συνδυασμό των ηλεκτρικών μετρήσεων με οπτικές παρατηρήσεις για την εκδήλωση ακουστικών και φωτεινών φαινομένων, καθώς και αλλαγές στην επιφάνεια του υλικού.

Στην κβαντομηχανική θεωρία ενδιαφέρει κυρίως η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια) κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνση τους στα ηλεκτρόδια. Πρόκειται δηλαδή για μια συσχέτιση των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση, με το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται.

### **1.9.1 Μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών**

Όπως ήδη έχει αναφερθεί τα στερεά μονωτικά υλικά αποκτούν συνήθως μόνιμες βλάβες προ της διάσπασης και καταστρέφονται κατά τη διάτρηση. Η ανάγκη για να δοθεί μια εξήγηση στις παραπάνω αλλαγές των υλικών οδήγησε στην αναζήτηση των διαφόρων παραγόντων που τις προκαλούν. Έτσι από μετρήσεις που έχουν γίνει σε στερεά μονωτικά οι οποίες έχουν συνδυαστεί με παρατηρήσεις σχετικά με την αλλαγή της μοριακής δομής, που προκαλείται στα υλικά αυτά, θεωρείται ότι υπάρχουν οι παρακάτω βασικοί παράγοντες μείωσης της σταθερότητας των μορίων τους :

- α) Οι απώλειες Joule
- β) Οι δυνάμεις Coulomb
- γ) Οι μερικές εκκενώσεις
- δ) Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος

Οι αντίστοιχες προς τους παραπάνω παράγοντες θεωρητικές μορφές της διάτρησης είναι:

- α) Η θερμική διάτρηση
- β) Η ηλεκτρική διάτρηση (που διακρίνεται στη δένδροειδή και την ηλεκτρομηχανική)
- γ) Η ηλεκτροχημική διάτρηση (ή γήρανση) και
- δ) Η θερμοχημική διάτρηση

Στη πράξη βέβαια συνδυάζονται οι παράγοντες αυτού και υποβοηθούνται υπό διάφορες ειδικές συνθήκες, που επικρατούν (μορφή ηλεκτρικού πεδίου, περιβάλλον μέσο) , έτσι ώστε η αλλαγή της μοριακής δομής να είναι κάποιο από κοινού αποτέλεσμα τους.

#### **1.9.1.1 Η θερμική διάτρηση**

Η θερμική διάτρηση οφείλεται στις απώλειες Joule. Συμβαίνει συνήθως σε μια περιοχή του υλικού όπου η ειδική αγωγιμότητα έτυχε να είναι αυξημένη λόγω ανομοιογενειών. Η μορφή της διάτρησης αυτής συναντάται κυρίως σε χαμηλές τιμές της τάσης, όταν το στερεό μονωτικό καταπονείται θερμικά μόνο από τις απώλειες Joule (π.χ κακή απαγωγή της θερμότητας από τη μόνωση ενός καλωδίου λόγω σκόνης και ύγρανσης). Η ειδική αγωγιμότητα  $\sigma$  του ηλεκτρομονωτικού υλικού, κατά τη θερμική καταπόνηση του δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-(W_i / KT)} \quad (1.9.1.1-1)$$

όπου :  $\sigma_0$ : η αρχική ειδική αγωγιμότητα

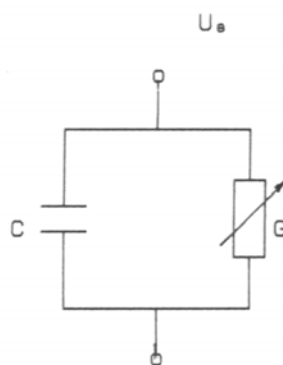
$W_i$  : η ενέργεια ενεργοποίησης του στερεού ηλεκτρομονωτικού υλικού,

$K$ : η σταθερά Boltzmann

$T$  : η απόλυτη θερμοκρασία

Την αύξηση των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού κατά την εφαρμογή της εναλλασσόμενης τάσης με ενεργό τιμή  $U_\theta$  μπορεί να παραστήσει κανείς με ένα ισοδύναμο κύκλωμα, κατά το σχήμα 1.9.1.1-1, όπου η αύξηση των απωλειών Joule συμβολίζεται με μία μεταβλητή αγωγιμότητα  $G$ .

Η διάτρηση στην τιμή  $U_\theta$  συμβαίνει, όταν η αγωγιμότητα αποκτήσει (λόγω αύξησης της ειδικής αγωγιμότητας από  $\sigma_0$  στην τιμή  $\sigma_1$ ), μία οριστική τιμή  $G_{\max}$ .



**Σχήμα 1.9.1.1-1** : Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού λόγω αύξησης των απωλειών Joule.

$$G = G_0 \dots G_{\max}$$

$G_0$  : αγωγιμότητα του ιδανικού μονωτή

$G_{\max}$ : αγωγιμότητα για τη διάτρηση

$C$  : χωρητικότητα του ιδανικού μονωτή

### 1.9.1.2 Η ηλεκτρική διάτρηση

Όταν η σταθερή ενεργός τιμή της τάσης, που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, είναι αρκετά μεγαλύτερη από εκείνη για τη θερμική διάτρηση, τότε η πεδιακή ένταση γίνεται μεγαλύτερη και επομένως μπορεί να αυξηθεί η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων μέσα στο μονωτικό υλικό.

Από μία τιμή της τάσης και μετά η διάτρηση του υλικού αποδίδεται κυρίως στις δυνάμεις Coulomb. Θεωρείται, ότι η διάτρηση οφείλεται σε :

α) αυτοσυντηρούμενο ιονισμό με κρούσεις (όπως στα αέρια μονωτικά), ή

β) μηχανική τάνυση του υλικού (διαχωρισμό του σε αρνητικούς και θετικούς φορείς, υπό την

επίδραση των δυνάμεων του ηλεκτρικού πεδίου), ή

γ) συνδυασμό των δύο παραπάνω περιπτώσεων.

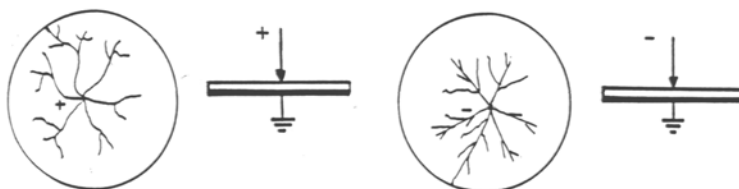
Η μορφή της διάτρησης αυτής ονομάζεται ηλεκτρική και διακρίνεται, ανάλογα με την εικόνα που παρουσιάζει το ηλεκτρικό τόξο κατά τη διάτρηση:

- στη δενδροειδή (θύσανοι κάθετοι προς το ηλεκτρικό πεδίο) και
- εκείνη υπό μορφή οχτού κατά τη διεύθυνση του πεδίου (ηλεκτρομηχανική).

Η δενδροειδής διάτρηση είναι ένα θερμικό φαινόμενο μικρότερης χρονικής διάρκειας από εκείνο της θερμικής διάτρησης, γιατί, λόγω της μεγαλύτερης τιμής της τάσης και επομένως της πεδιακής έντασης, δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια με κρούσεις. Η εικόνα του υλικού μετά τη διάτρηση σχετίζεται με θερμική καταπόνηση στα ίχνη του δενδρίτη. Η διάτρηση συμβαίνει όταν μία διακλάδωση του δενδρίτη ολοκληρώνει την πλήρη αγωγή σύνδεση των ηλεκτροδίων. Στο σχήμα 1.9.1.2-1 δίνεται ένα παράδειγμα για τη μορφή του δενδρίτη (ανάλογα με την πολικότητα της τάσης) για τη δυσμενέστερη περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών (ηλεκτρόδια ακίδα-πλάκα).

Στην περίπτωση της θετικής ακίδας ο δενδρίτης έχει, λόγω των δυνάμεων Coulomb που εξασκούνται μεταξύ των ελεύθερων αρνητικών ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια) κατά την κίνηση τους προς την ακίδα, αρκετές διακλαδώσεις (κατά κανόνα μη ευθύγραμμες).

Όταν όμως η ακίδα είναι αρνητική, οι δυνάμεις απομάκρυνσης μεταξύ των ελεύθερων αρνητικών ηλεκτρικών φορέων είναι, λόγω της μεγάλης ακτίνας, μικρότερες και έτσι οι διαδρομές είναι περίπου οι ακτίνες του κύκλου, των οποίων όμως η λαμπρότητα μειώνεται προς την περιφέρειά του. Έχουμε δηλαδή, ανάλογα με την πολικότητα της ακίδας, ομοιότητα με τις εικόνες Lichtenberg κατά τη μέτρηση κεραυνών.

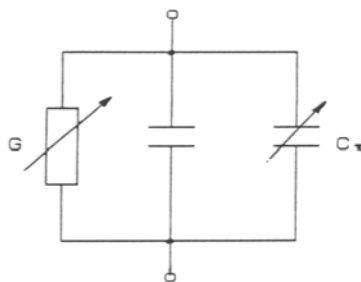


**Σχήμα 1.9.1.2-1 :** Προς επεξήγηση της μορφής του δενδρίτη

Η διάτρηση υπό μορφή οχετού (ή ηλεκτρομηχανική διάτρηση) οφείλεται στην πολύ μεγαλύτερη τιμή της πεδιακής έντασης, από ότι κατά τη δενδροειδή διάτρηση. Στα πολυμερή υλικά διαχωρίζονται τα μόρια σε αρνητικούς και θετικούς φορείς. Η διάτρηση συμβαίνει κυρίως από τις δυνάμεις Coulomb, που εξασκούνται μεταξύ ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και ηλεκτροδίων. Η χρονική διάρκεια του φαινομένου είναι μερικά μs. Η εικόνα, που παρουσιάζει το υλικό ότι είναι κυρίως το αποτέλεσμα μίας ακαριαίας εξάσκησης δυνάμεων, στην περιοχή όπου η πεδιακή ένταση είναι ιδιαίτερα μεγάλη (μηχανική τάνυση, υπό την επίδραση των δυνάμεων του πεδίου).

Κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις έχει διαπιστωθεί, ότι πάνω από μία μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης  $U_{κmin}$ , που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, συμβαίνει η διάτρηση με μία κρούση υπό μορφή οχετού, αν και η τιμή της πεδιακής έντασης είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη κατά την ηλεκτρομηχανική διάτρηση υπό εναλλασσόμενη τάση καταπόνησης. Η μορφή της διάτρησης αυτής χαρακτηρίζεται επίσης ως ηλεκτρομηχανική. Το φαινόμενο έχει αποδοθεί στην απότομη μεταβολή της πεδιακής έντασης, λόγω της οποίας δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα την ηλεκτρομηχανική διάτρηση από τις δυνάμεις Coulomb μεταξύ του αρνητικού ηλεκτροδίου και των θετικών ηλεκτρικών φορέων, που συγκρατούνται στο πλέγμα των μορίων.

Μία ερμηνεία της ηλεκτρικής διάτρησης, μέσω ενός ισοδύναμου κυκλώματος, μπορεί να δοθεί σχηματικά στο σχήμα 1.9.1.2-2 :



**Σχήμα 1.9.1.2-2 :** Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού κατά την ηλεκτρική διάτρηση.

$C$  : ιδανική χωρητικότητα

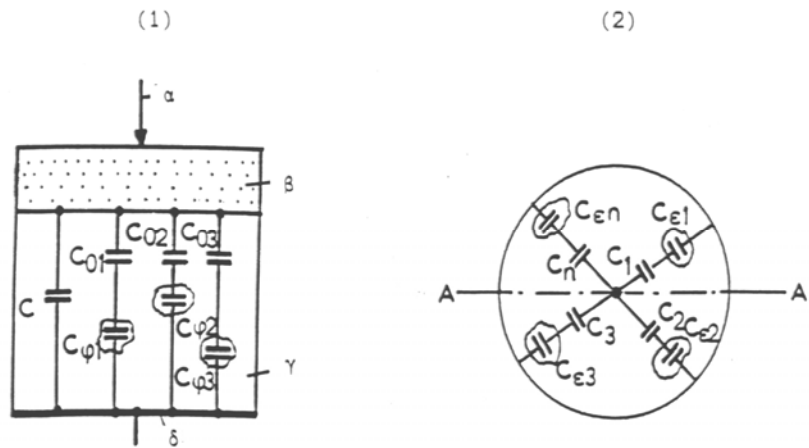
$C_{\pi}=0...C_{max}$  : χωρητικότητα, που συμβολίζει την πόλωση του στερεού μονωτικού στη θέση θα συμβεί η διάτρηση.

$G=0...G_{max}$  : αγωγιμότητα λόγω αύξησης των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στη θέση όπου θα συμβεί η διάτρηση

Όταν από την αύξηση των ηλεκτρικών φορέων, λόγω κάποιας ανομοιογένειας (δεν υπάρχουν πρακτικά ιδανικοί μονωτές), η ειδική αγωγιμότητα έχει αποκτήσει μία κρίσιμη για το υλικό τιμή  $\sigma_2$ , η πόλωση του υλικού είναι αρκετή για να συμβεί η διάτρηση από τις δυνάμεις Coulomb μεταξύ ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και ηλεκτροδίων. Η πόλωση αυτή του υλικού στην περιοχή, όπου θα συμβεί η διάτρηση, μπορεί να παρασταθεί σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα (σχήμα 1.9.1.2-2), ως αύξηση της χωρητικότητας από την παράλληλη σύνδεση ενός μεταβλητού πυκνωτή  $C_\pi$  (που συμβολίζει την πόλωση) προς την ιδανική χωρητικότητα  $C$ . Όταν η αγωγιμότητα  $G$  και ο πυκνωτής  $C_\pi$  έχουν αποκτήσει μόλις προ της διάτρησης τις τιμές  $G_{\max}$  και  $C_{\max}$  (που αντιστοιχούν στην κρίσιμη ειδική αγωγιμότητα  $\sigma_2$ , λόγω κάποιας ανομοιογένειας), τότε συμβαίνει η διάτρηση.

### **1.9.1.3 Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτρομηχανική διάσπαση ή γήρανση της μόνωσης)**

Η διάσπαση των στερεών μονωτικών έχει, στις περισσότερες περιπτώσεις, την αφετηρία μερικές εκκενώσεις στην επιφάνεια και στον όγκο τους. Οι μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται σε φυσαλίδες αερίων ή γενικά θέσεις ανομοιογένειας μέσα στον όγκο του μονωτικού (εσωτερικές μερικές εκκενώσεις), καθώς και σε θέσεις ανομοιογένειας ή ξένες επικαθίσεις (ηλεκτρικές ακαθαρσίες) στην επιφάνεια του (εξωτερικές εκκενώσεις). Μία μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχής δίνεται στο σχήμα 1.9.1.3-1. Σύμφωνα με αυτό, οι επιφανειακές θέσεις διαταραχής έχουν παρασταθεί με τους πυκνωτές  $C_{e1} \dots C_{en}$  και οι εσωτερικές με τους πυκνωτές  $C_{\phi 1} \dots C_{\phi n}$ . Οι πυκνωτές  $C_1 \dots C_n$  και  $C_{01} \dots C_{0n}$  παριστάνουν αντίστοιχα το υπόλοιπο υγιές τμήμα του μονωτικού (κάθε ένας από αυτούς δίνει την ολική χωρητικότητα δύο πυκνωτών, εκ των οποίων ο ένας είναι η χωρητικότητα μεταξύ ακίδας και της θέσης διαταραχής και ο άλλος η χωρητικότητα μεταξύ της πλάκας και της θέσης διαταραχής).



**Σχήμα 1.9.1.3-1:** Μία μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχής σε στερεό μονωτικό εντός μονωτικού ελαίου

1) Τομή A-A της διάταξης πειραματισμού :

α : ηλεκτρόδιο ακίδα

β: επιφανειακό φιλμ του μονωτικού ελαίου και επιφάνεια του στερεού μονωτικού.

γ : στερεό μονωτικό

δ : ηλεκτρόδιο πλάκα

2) Κάτοψη της διάταξης πειραματισμού :

$C_1 \dots C_n$ : πυκνωτές του "υγιούς" τμήματος της επιφάνειας του στερεού μονωτικού και του επιφανειακού φιλμ ελαίου

$C_{ε1} \dots C_{εn}$  : πυκνωτές επιφανειακών (εξωτερικών) θέσεων διαταραχής

$C$  : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

$C_{φ1} \dots C_{φn}$  : πυκνωτές εσωτερικών θέσεων διαταραχής (κυρίως φυσαλίδες αερίων)

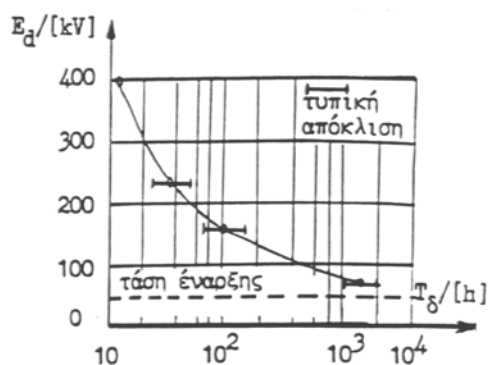
$C_{01} \dots C_{0n}$  : πυκνωτές του "υγιούς" τμήματος του στερεού μονωτικού

Από τη στιγμή της έναρξης των μερικών εκκενώσεων προκαλείται συνήθως σταδιακή αλλαγή της μοριακής δομής του στερεού μονωτικού, η οποία είναι ιδιαίτερα έντονη σε περιορισμένο τμήμα του, όπου δηλαδή έτυχε οι θέσεις ανομοιογένειας να είναι περισσότερο αγωγίμες. Πρόκειται για ένα ηλεκτροχημικό φαινόμενο, που σε κάποιο απροσδιόριστο χρονικό διάστημα οδηγεί στη διάσπαση του στερεού μονωτικού.

Συγκριτικά με τις άλλες μορφές διάσπασης, η ηλεκτροχημική διάσπαση προκαλεί βαθμιαία μείωση της ηλεκτρικής αντοχής, ανάλογα με το ρυθμό αύξησης της χημικής



μεταβολής και είναι συνήθως μακροπρόθεσμη, γι' αυτό ονομάζεται και γήρανση του μονωτικού υλικού. Στο Σχήμα 1.9.1.3-2 δίνεται ένα παράδειγμα μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, λόγω γήρανσης του υλικού από τη μεγαλύτερη συμμετοχή των θέσεων διαταραχής.



**Σχήμα 1.9.1.3-2 :** Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στο νάιλον πάχος 0,125mm, λόγω μερικών εκκενώσεων.

Αριθμός δοκιμών : 10 ανά σημείο μέτρησης.

$T_d$  : χρόνος διάσπασης.

Κατά την καταπόνηση ενός στερεού μονωτικού υλικού με κάποια μορφή τάσης (εναλλασσόμενη, κρουστική ή συνεχή), διαπιστώνει κανείς ότι μετά από κάποια τιμή της τάσης (ανάλογα με τη μορφή της) εμφανίζονται μερικές εκκενώσεις.

Η γήρανση του μονωτικού υλικού στο εργαστήριο με τιμές της τάσης μεγαλύτερες από την τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων χαρακτηρίζεται τεχνητή γήρανση. Η τεχνητή αυτή γήρανση του στερεού μονωτικού δεν ανταποκρίνεται βέβαια στην πραγματική κατάσταση, που δημιουργείται με την πάροδο του χρόνου (όταν το υλικό εργάζεται υπό ονομαστικά μεγέθη στο δίκτυο), δίνει όμως τη δυνατότητα ανίχνευσης των παραγόντων διάσπασης, που τελικά δεν μπορεί να είναι διαφορετικοί από τους πραγματικούς.

#### **1.9.1.4 Θερμοχημική Διάτρηση**

Η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής είναι δεδομένη κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου, γιατί η παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων γίνεται μεγαλύτερη. Στα πολυμερή μονωτικά υλικά μπορούμε να υποθέσουμε ότι εξασθενούν οι δεσμοί των μορίων και επομένως και η ενέργεια εξόδου των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων από το πλέγμα των μορίων είναι μικρότερη.

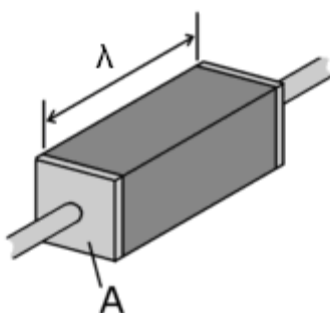
Η διάτρηση που προκαλείται από μόνο από τη θερμότητα του περιβάλλοντος στερεού μονωτικού μέσου ονομάζεται θερμοχημική. Έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι, μετά από μια τιμή της τάσης, η θερμοχημική διάτρηση δεν αντιμετωπίζεται με την αύξηση του πάχους της μόνωσης. Η τάση αυτή ονομάζεται θερμική τάση ανατροπής. Η τάση αυτή αποτελεί το κριτήριο για το τεχνοοικονομικό πάχος στερεών μονωτικών στις πρακτικές εφαρμογές (όπως μετασχηματιστές, καλώδια κτλ ) η τιμή είναι για τα περισσότερα υλικά, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C και καταπόνηση με εναλλασσόμενη τάση 50 Hz της τάξης του 1MV.

Πρόσφατες έρευνες σε στερεά μονωτικά έδειξαν ότι η αύξηση της θερμοκρασίας στο περιβάλλον μέσο του στερεού μονωτικού ενισχύει τις μερικές εκκενώσεις, με αποτέλεσμα τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής. Έχει διαπιστωθεί επίσης ότι οι μερικές εκκενώσεις εκδηλώνονται, λόγω της θερμότητας του περιβάλλοντος σε μικρότερες τιμές της τάσης από ότι σε κανονική θερμοκρασία 20 °C , με αποτέλεσμα να συμβαίνει ο ιονισμός διά κρούσεως σε αρκετά μικρότερες τιμές του πεδίου από ότι κατά την καταπόνηση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C.

### **1.10 Αντίσταση όγκου – Ειδική αντίσταση όγκου**

Η αντίσταση όγκου ενός υλικού ( $R_V$ ) ορίζεται ως η αντίσταση στην ροή του ρεύματος όταν εφαρμοστεί σε αυτό συνεχής τάση στις απέναντι πλευρές του μέσω δύο ηλεκτροδίων που βρίσκονται σε επαφή με αυτό.

Η ειδική αντίσταση όγκου ( $\rho_V$ ) ορίζεται ως η ηλεκτρική αντίσταση ενός κύβου μονωτικού υλικού και είναι ανεξάρτητη από τις διαστάσεις του υλικού και των ηλεκτροδίων.



**Σχήμα 1.10-1 :** Η διάταξη ηλεκτροδίου-υλικού για μέτρηση της αντίστασης όγκου

Η ειδική αντίσταση όγκου δίνεται από τη σχέση (1.10-1) :

$$p_V = R_V \cdot \frac{A}{\lambda} \quad (1.10-1)$$

όπου  $A$  το εμβαδόν διατομής (κάτω επιφάνεια ηλεκτροδίου),  $\lambda$  το πάχος του υλικού,  $R_v$  η αντίσταση όγκου του υλικού.

Η μονάδα μέτρησης της ειδικής αντίστασης όγκου είναι το  $\text{Ohm.m}$ , ωστόσο συνήθως στους πίνακες συναντάται το  $\text{Ohm.cm}$  ( $\Omega.\text{cm}$ ).

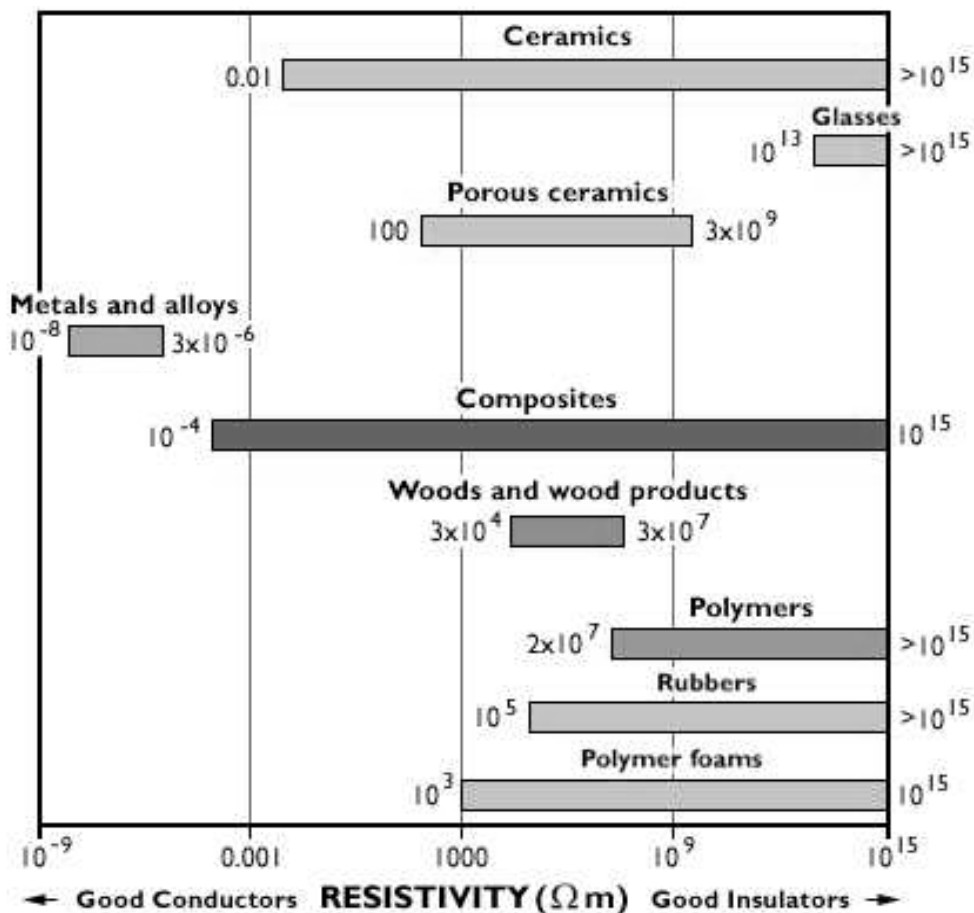
Η αγωγιμότητα όγκου ορίζεται ως ο λόγος του ρεύματος που ρέει στον όγκο ενός υλικού μεταξύ 2 ηλεκτροδίων προς την εφαρμοζόμενη τάση μεταξύ των 2 ηλεκτροδίων. Ισχύει δηλαδή :

$$Y_v = \frac{1}{R_v} \quad (1.10-$$

2)

Επιπλέον, η ειδική αγωγιμότητα όγκου ορίζεται ως το αντίστροφο της ειδικής αντίστασης όγκου.

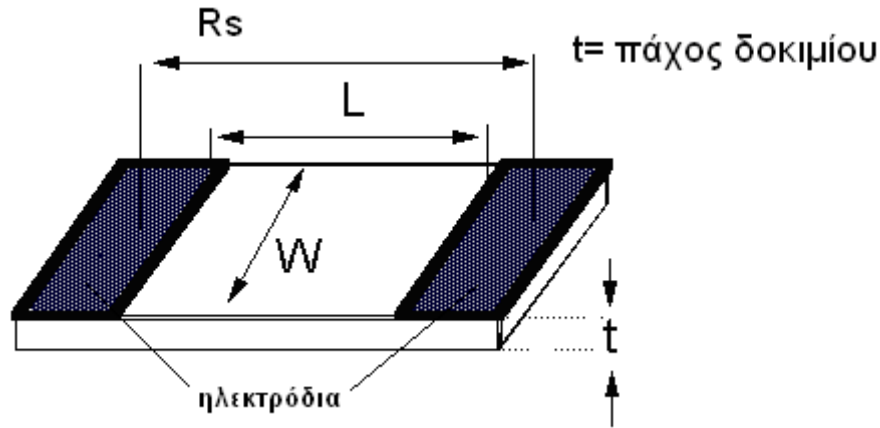
Στο σχήμα 1.10-1 φαίνονται οι τιμές ειδικής αντίστασης όγκου διαφόρων υλικών και ο χαρακτηρισμός αυτών σε καλούς αγωγούς και μονωτές ανάλογα με την αντίστασή τους.



Σχήμα 1.10-1 Γενικό διάγραμμα ειδικής αντίστασης όγκου υλικών

### 1.11 Αντίσταση επιφάνειας – Ειδική αντίσταση επιφάνειας

Η αντίσταση επιφάνειας ( $R_s$ ) ορίζεται ως ο λόγος της συνεχούς τάσης που εφαρμόζεται μεταξύ 2 ηλεκτροδίων στην ίδια επιφάνεια ενός υλικού προς το ρεύμα που ρέει μεταξύ των ηλεκτροδίων.



**Σχήμα 1.11-1 :** Η διάταξη ηλεκτροδίου-υλικού για μέτρηση της αντίστασης επιφάνειας

Η ειδική αντίσταση επιφάνειας είναι η αντίσταση της επιφάνειας, πολλαπλασιασμένη με τις διαστάσεις της επιφάνειας της διάταξης.

Συγκεκριμένα:

$$\rho_s = R_s \cdot \frac{W}{L} \quad (\text{Ohm}) \quad (1.11.1)$$

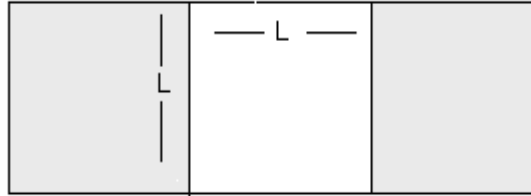
Έτσι, όταν έχουμε τετραγωνική διάταξη ( $W=L$ ), ανεξάρτητα από το μέγεθος του τετραγώνου τότε ισχύει ότι :

$$\rho_s = R_s \quad (1.11.2)$$

Επιπλέον για τη διαφοροποίηση της αντίστασης επιφάνειας με την ειδική αντίσταση επιφάνειας, έχει επικρατήσει ως μονάδα μέτρησης της ειδικής αντίστασης επιφάνειας το Ohm/square ( $\Omega$ / τετράγωνο), αν και η φυσική της μονάδα μέτρησης της είναι το Ohm. Η αγωγιμότητα επιφάνειας και η ειδική αγωγιμότητα επιφάνειας είναι τα αντίστροφα μεγέθη της αντίστασης επιφάνειας και της ειδικής αντίστασης επιφάνειας αντίστοιχα.

Η ειδική αντίσταση επιφάνειας είναι ανεξάρτητη από τις διαστάσεις της διάταξης. Για την απόδειξη της πιο πάνω πρότασης, στα σχήματα 1.11-2, 1.11-3 και 1.11-4 δίνονται 3

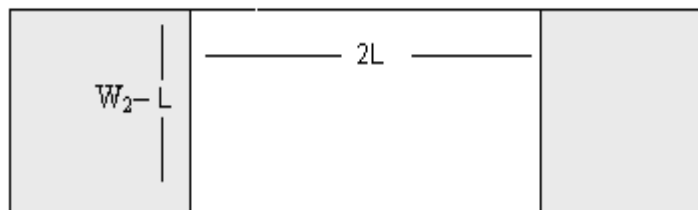
διαφορετικές διατάξεις και υπολογίζεται η ειδική αντίσταση επιφάνειας αυτών. Για τη διάταξη του σχ.1.11-2 ισχύει ότι  $\rho_s = R_s$  ( $W=L$ ).



**Σχήμα 1.11-2** : Τετραγωνική Διάταξη ( $W=L$ )

Για τη διάταξη του σχ.1.11-3 ισχύει ότι  $R_{s2} = 2R_s$  αφού είναι σαν να έχει προστεθεί στη διάταξη του σχ.1.11-2 μια αντίσταση σε σειρά μεταξύ των ηλεκτροδίων. Επιπλέον,  $W_2=L$  και  $L_2=2L$  και αντικαθιστώντας στη σχέση (1.11-1) τότε :

$$\rho_{s2} = R_{s2} \cdot \frac{W_2}{L_2} = 2R_s \cdot \frac{L}{2L} = R_s .$$

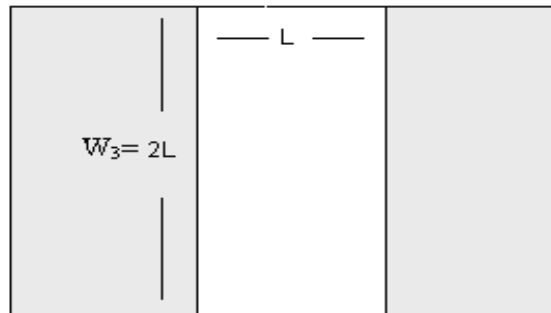


**Σχήμα 1.11-3** : Διάταξη με την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων να είναι διπλάσια από το πλάτος του δοκιμίου ( $L_2=2 \cdot W_2$ )

Για τη διάταξη του σχ.1.11-4 ισχύει ότι  $R_{s2} = \frac{1}{2} R_s$  αφού είναι σαν να έχει προστεθεί στη διάταξη του σχ.1.11-2 μια αντίσταση παράλληλα μεταξύ των ηλεκτροδίων. Επιπλέον,  $W_3=2L$  και  $L_3=L$  και αντικαθιστώντας στη σχέση (1.11-1) τότε

$$\rho_{s3} = R_{s3} \cdot \frac{W_3}{L_3} = \frac{1}{2} R_s \cdot \frac{2L}{L} = R_s .$$

Επομένως και στις τρεις διατάξεις η ειδική αντίσταση επιφάνειας είναι η ίδια.



**Σχήμα 1.11-4** : Διάταξη με την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων να είναι η μισή από το πλάτος του δοκιμίου ( $L_2=W_2/2$ )

### **1.12 Σημασία μέτρησης αντίστασης μόνωσης στα μονωτικά υλικά**

Τα μονωτικά υλικά χρησιμοποιούνται για να απομονώσουν τα στοιχεία ενός ηλεκτρικού συστήματος μεταξύ τους και από τη γη καθώς και για να προσφέρουν μηχανική υποστήριξη όπου απαιτείται. Χρησιμοποιούνται ευρέως ως μονωτικά μέσα μεταξύ των αγωγών που βρίσκονται σε διαφορετική τάση και αποτρέπουν τον ιονισμό του αέρα και τη δημιουργία ηλεκτρικών εκκενώσεων μεταξύ των αγωγών. Για αυτούς τους λόγους, είναι γενικά επιθυμητό το μονωτικό υλικό να έχει ψηλή και σταθερή αντίσταση μόνωσης και επιπλέον αποδεκτές μηχανικές, χημικές και θερμικές ιδιότητες.

Η αντίσταση μόνωσης ενός υλικού περιλαμβάνει την αντίσταση όγκου και την αντίσταση της επιφάνειας του υλικού. Είναι περισσότερο χρήσιμο, το δοκίμιο και τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται στη διάταξη, να έχουν την ίδια διαμόρφωση όπως απαιτεί η πραγματική τους χρήση.

Η ειδική αντίσταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προβλεφθεί η διάσπαση του υλικού σε χαμηλή συχνότητα καθώς και ο συντελεστής απωλειών του υλικού (εφδ). Επίσης, η μέτρηση της ειδικής αντίστασης συχνά χρησιμοποιείται ως μια έμμεση μέτρηση της περιεκτικότητας σε υγρασία, του βαθμού συντήρησης της μόνωσης, της μηχανικής συνοχής και της αλλοίωσης της μόνωσης διαφόρων τύπων.

Όλες οι διηλεκτρικές αντιστάσεις εξαρτώνται από το χρόνο εφαρμογής της τάσης και στην τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης. Αυτά τα 2 μεγέθη πρέπει να είναι γνωστά για να είναι χρήσιμη η τιμή της μετρούμενης αντίστασης.

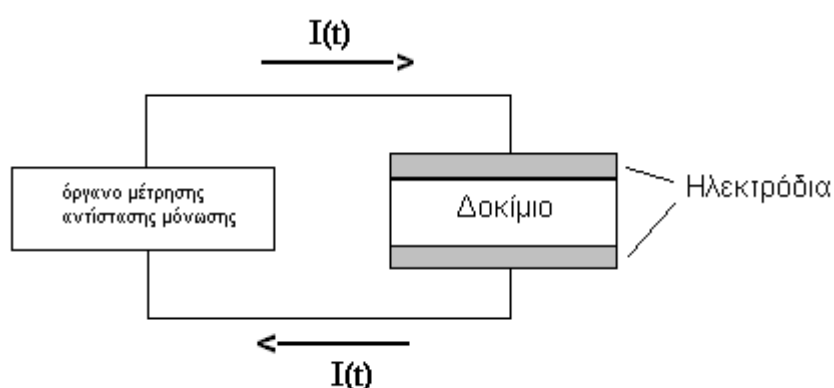
Η αλλαγή της αντίστασης με τη μεταβολή της θερμοκρασίας ή της υγρασίας μπορεί να είναι μεγάλη και πρέπει να υπολογιστεί όταν σχεδιάζεται ένα υλικό για συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας.

Ο καθορισμός της ειδικής αντίστασης χρησιμοποιείται συχνά για τον έλεγχο της ομοιομορφίας ενός μονωτικού υλικού αλλά και για τον εντοπισμό ατελειών που επηρεάζουν την ποιότητα της μόνωσης και μπορεί να μην εντοπιστούν από άλλες μεθόδους.

Ειδικές αντιστάσεις όγκου πάνω από  $10^{21} \Omega\text{cm}$  ( $10^{19} \Omega\text{m}$ ) που παρατηρούνται σε δοκίμια κάτω από συνήθεις εργαστηριακές συνθήκες, είναι αμφιλεγόμενης εγκυρότητας, εξαιτίας των περιορισμών των συνήθων εξοπλισμών μέτρησης.

## **1.13 Παράγοντες που επηρεάζουν την αντίσταση μόνωσης**

### **1.13.1 Εξάρτηση αντίστασης μόνωσης από το ρεύμα**



**Σχήμα 1.13.1-1** Κύκλωμα μέτρησης αντίστασης μόνωσης

Το συνολικό ρεύμα που ρέει στο κύκλωμα μέτρησης αντίστασης (σχήμα 1.13.1-1) είναι το άθροισμα τριών ρευμάτων, όπως φαίνεται από την παρακάτω εξίσωση :

$$I(t) = I_r(t) + I_a(t) + I_c(t) \quad (1.13.1-1)$$

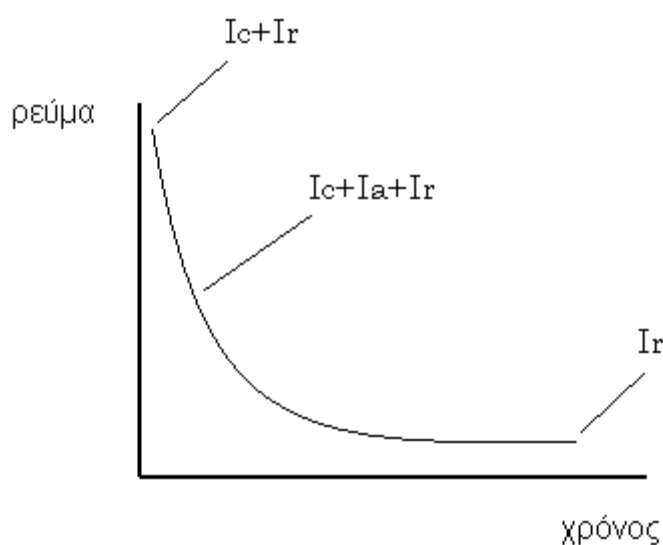
Το ρεύμα διαρροής ( $I_r(t)$ , leakage current) είναι το ρεύμα που διαρρέει την ωμική αντίσταση του υλικού και είναι σταθερό με το χρόνο. Μετά από ένα χρονικό διάστημα (διαφορετικό ανάλογα με το υλικό) ισούται με το ολικό ρεύμα καθώς τα άλλα 2 ρεύματα μηδενίζονται.

Το ρεύμα φόρτισης ( $I_c(t)$ , charge current) δείχνει το ρεύμα που ρέει από ένα ιδανικό πυκνωτή και εμφανίζεται αμέσως μετά την εφαρμογή της τάσης. Καθώς ο πυκνωτής σταδιακά φορτίζεται, το ρεύμα μειώνεται εκθετικά.

Το ρεύμα απορρόφησης ( $I_a(t)$ , absorption current) ρέει με μια μικρή καθυστέρηση σε σχέση με το ρεύμα φόρτισης και οφείλεται στην πόλωση των μορίων στο διηλεκτρικό υλικό. Το ρεύμα αυτό μειώνεται καθώς απορροφούνται τα ηλεκτρόνια και η ικανότητα του κυκλώματος να απορροφά ηλεκτρόνια φτάνει στο όριο της. Ο χρόνος που απαιτείται για τη

διηλεκτρική απορρόφηση κυμαίνεται από μερικά δευτερόλεπτα σε αρκετές ώρες. Για μονωτικά υλικά με αντίσταση μόνωσης μικρότερη από  $10^{11} \Omega$  απαιτείται χρόνος μικρότερος από 1 λεπτό για να σταθεροποιηθούν ενώ υλικά με αντίσταση μόνωσης μεγαλύτερη από  $10^{13} \Omega$  μπορεί να χρειαστεί να περάσουν αρκετές ώρες από την εφαρμογή της τάσης για να μηδενιστεί το ρεύμα απορρόφησης.

Ενδεικτικά παρατίθεται ένα διάγραμμα (σχήμα 1.13.1-2) που δείχνει την μεταβολή των τριών ρευμάτων με το χρόνο εφαρμογής της τάσης στο υλικό



**Σχήμα 1.13.1-2** Γραφική απεικόνιση των ρευμάτων συναρτήσει του χρόνου μετά από την εφαρμογή τάσης στο υλικό

Συμπερασματικά, η τιμή του ολικού ρεύματος εξαρτάται από το χρόνο εφαρμογής της τάσης στο υλικό. Αυτό σημαίνει ότι η αντίσταση μόνωσης δεν μπορεί να καθοριστεί αν δεν διασαφηνιστεί ο χρόνος μέτρησης. Ο συμβατικός χρόνος μέτρησης έχει καθοριστεί από τα πρότυπα μέτρησης αντίστασης μόνωσης στο 1 λεπτό.

### **1.13.2 Επίδραση θερμοκρασίας στην αντίσταση μόνωσης**

Στους μονωτές, η αντίσταση μόνωσης μεταβάλλεται με τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Η αντίσταση στη ροή του ρεύματος μειώνεται καθώς η θερμοκρασία του υλικού αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει γιατί η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει την κινητικότητα των ηλεκτρονίων και συνεπώς αυξάνεται το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει το υλικό. Έτσι επειδή



η αντίσταση μόνωσης είναι εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία απαιτείται ο καθορισμός μιας κοινής θερμοκρασίας διεξαγωγής των μετρήσεων. Το πρότυπο ASTM D257 ορίζει ως θερμοκρασία μέτρησης τους 20°C. Οι μετρήσεις που έχουν γίνει σε θερμοκρασία διαφορετική από τη θερμοκρασία μέτρησης πρέπει να ανηχθούν με ένα συντελεστή διόρθωσης, διαφορετικό ανάλογα με το υλικό, στην ορισμένη θερμοκρασία μέτρησης.

### **1.13.3 Επίδραση υγρασίας και ρύπανσης στην αντίσταση μόνωσης**

Η επιφανειακή αγωγιμότητα επηρεάζεται σημαντικά από την υγρασία του περιβάλλοντος και από τη ρύπανση της επιφάνειας του σώματος. Όταν η σχετική υγρασία είναι μεγαλύτερη από 70-80% υπάρχει μεγάλη τροποποίηση της επιφανειακής αγωγιμότητας. Π.χ. σε ξηρή ατμόσφαιρα με περίπου 20% σχετική υγρασία το κοινό γυαλί έχει επιφανειακή αγωγιμότητα της τάξης του  $10^{-13}\Omega^{-1}$ . Σε υγρασία όμως 70% η επιφανειακή αγωγιμότητα ανεβαίνει στο  $10^{-11}\Omega^{-1}$  για καθαρή επιφάνεια ενώ για καθαρή επιφάνεια η αγωγιμότητα ανεβαίνει περίπου στο  $10^{-8}\Omega^{-1}$ . Η αύξηση αυτή της επιφανειακής αγωγιμότητας άρα μείωση της επιφανειακής αντίστασης οφείλεται στα ιόντα που συγκεντρώνονται στο λεπτό υδάτινο στρώμα που σχηματίζεται στην επιφάνεια των σωμάτων, όταν βρίσκονται σε υγρή ατμόσφαιρα. Τα ιόντα προέρχονται είτε από ακαθαρσίες που επικάθονται στην επιφάνεια των στερεών είτε από τη χημική δομή του σώματος. Η επίδραση της υγρασίας είναι μικρότερη σε μη διαβρέξιμα σώματα, διότι δεν σχηματίζεται εύκολα ένα συνεχές στρώμα στην επιφάνειά τους. Αντίθετα, στα πορώδη σώματα, η απορρόφηση υγρασίας στους πόρους τους διευκολύνει το σχηματισμό του επιφανειακού στρώματος νερού.

Σε υγρές συνθήκες, η υγρασία απορροφάται από το μονωτικό υλικό και μειώνεται δραστικά η τιμή της αντίστασης όγκου. Η υγρασία μειώνει σημαντικά την ειδική αντίσταση των ινωδών μονωτικών υλικών. Για να προστατευτούν τα υγροσκοπικά υλικά από την υγρασία, πρέπει να εμποτιστούν ή να επικαλύπτονται με μη υγροσκοπικά βερνίκια ή άλλα συνθετικά υλικά.

Η αντίσταση μόνωσης ενός εξοπλισμού γενικά βελτιώνεται με τη ξήρανση και παρέχοντας ένα μέσο που να αποτρέπει την πύκνωση της υγρασίας.



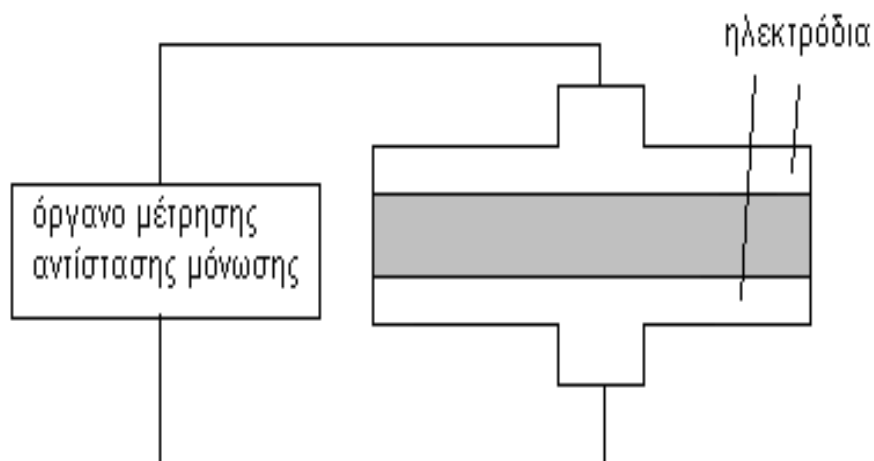
## Κεφάλαιο 2 : Η Διάταξη και η διαδικασία των μετρήσεων

### 2.1 Γενικά

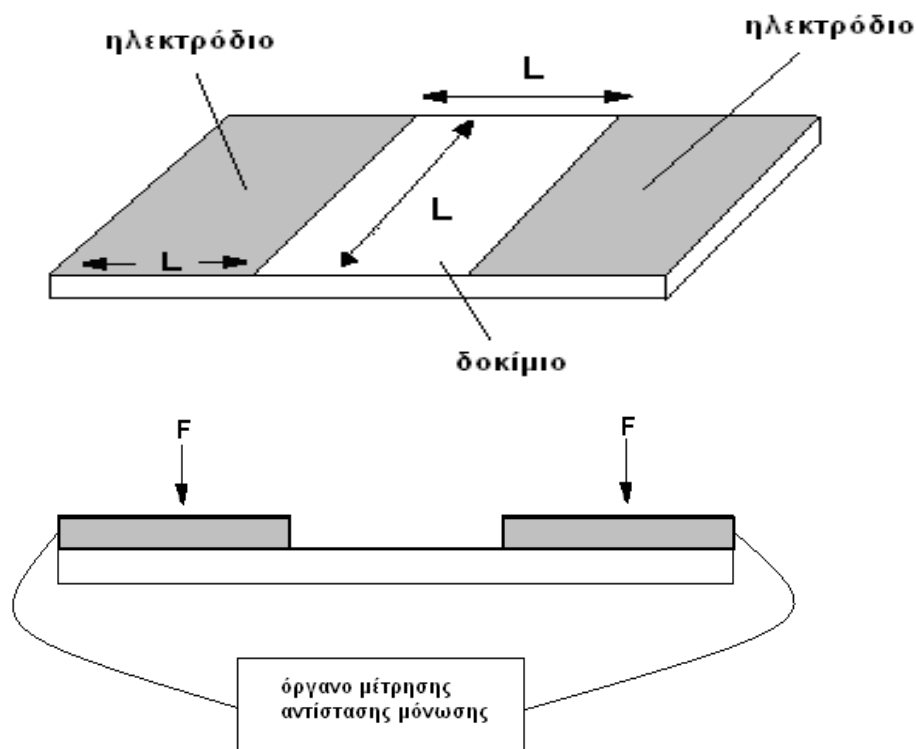
Σκοπός των μετρήσεων είναι ο πειραματικός υπολογισμός της ειδικής αντίστασης όγκου και επιφάνειας ενός στερεού μονωτικού υλικού, καθώς και η παρατήρηση της μεταβολής της αντίστασης με τη μεταβολή παραγόντων όπως η τάση, ο χρόνος εφαρμογής της τάσης και η μορφή και το βάρος των ηλεκτροδίων καθώς και η παρατήρηση των τιμών της αντίστασης για διαφορετικά μονωτικά υλικά και για διαφορετικά πάχη.

### 2.2 Η Διάταξη των μετρήσεων

Η διάταξη που θα χρησιμοποιηθεί για τις μετρήσεις της αντίστασης όγκου δίνεται σχηματικά στο σχήμα 2.2-1 ενώ η διάταξη που θα χρησιμοποιηθεί για τις μετρήσεις της αντίστασης επιφάνειας δίνεται σχηματικά στο σχήμα 2.2-2.



**Σχήμα 2.2-1 :** Απλοποιημένο σχέδιο της διάταξης για την μέτρηση της αντίστασης όγκου



**Σχήμα 2.2-2 :** Απλοποιημένο σχέδιο της διάταξης για την μέτρηση της αντίστασης επιφάνειας

Με την διάταξη του σχήματος 2.2-2 (μήκος ηλεκτροδίου=απόσταση ηλεκτροδίων), η μετρούμενη αντίσταση ισούται με την ειδική αντίσταση επιφάνειας αφού  $p_s = R \cdot w / L$  και για  $w$  (μήκος ηλεκτροδίου) =  $L$  (απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων)  $p_s = R_s$ . Έτσι, ουσιαστικά μετριέται απευθείας η ειδική αντίσταση επιφάνειας του υλικού.

Ως όργανο μέτρησης της αντίστασης μόνωσης θα χρησιμοποιηθεί το όργανο METRISO 5000D-PI 5000 V (βλ.ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ)

Τα ηλεκτρόδια της διάταξης του σχήματος 2.2-1 είναι κατασκευασμένα από μπρούντζο και έχουν κυκλική επιφάνεια επαφής. Για τη διάταξη αυτή θα χρησιμοποιηθούν τρεις τύποι ηλεκτροδίων ως ακολούθως :

Τύπος ηλεκτροδίου	Ίδιο βάρος (gr)	Διάμετρος (cm)	Επιφάνεια επαφής (cm <sup>2</sup> )
A	500	4	12,5664
B	100	3,2	8,0425
Γ	50	2,5	4,9087

Τα ηλεκτρόδια της διάταξης του σχήματος 2.2-2 είναι κατασκευασμένα από φύλλο χαλκού και έχουν τετραγωνική επιφάνεια επαφής. Για τη διάταξη αυτή θα χρησιμοποιηθούν δύο τύποι ηλεκτροδίων ως ακολούθως :

Τύπος ηλεκτροδίου	Διαστάσεις φύλλου (cm * cm)	Επιφάνεια επαφής (cm <sup>2</sup> )
Δ	4 * 4	16
E	3,2 * 3,2	10,24

Για την παρούσα εργασία, ως δοκίμια θα χρησιμοποιηθούν ηλεκτρομονωτικά υλικά με τη μορφή φύλλου ή ταινίας διαφόρων κατασκευαστών. Θα χρησιμοποιηθούν δοκίμια κυκλικής επιφάνειας (12,5664cm<sup>2</sup>, 80425cm<sup>2</sup> και 4,9087cm<sup>2</sup>) για τις μετρήσεις αντίστασης όγκου και δοκίμια ορθογώνιας επιφάνειας (4\*12cm και 3,2\*9,6cm) για τις μετρήσεις αντίστασης επιφάνειας. Για τους σκοπούς αυτής της εργασίας τα δοκίμια έχουν ονομαστεί ως ακολούθως :

Δοκίμιο	Υλικό	Πάχος (mm)
1	A	0,4
2	A	1,1
3	A	1,5
4	B	0,15
5	B	0,2
6	B	0,29
7	Γ	0,1
8	Γ	0,2
9	Γ	1
10	Δ	0,3
11	Δ	0,4
12	E	0,2
13	E	0,3
14	E	0,4
15	Z	0,24
16	H	0,42

## **2.3 Η Διαδικασία των μετρήσεων**

### **2.3.1 Η διαδικασία για της μετρήσεις αντίστασης όγκου**

Χρησιμοποιώντας τη διάταξη του σχήματος 2.2-1 και για τους τρεις τύπους ηλεκτροδίων θα γίνουν μετρήσεις στα 10s για συνεχή τάση εφαρμογής 100 έως 600V με βήμα 100. Επίσης, θα γίνουν μετρήσεις με βάση το πρότυπο ASTM D257.

### **2.3.2 Η διαδικασία για τις μετρήσεις μεταβολής αντίστασης όγκου με τη μεταβολή του βάρους των ηλεκτροδίων**

Χρησιμοποιώντας τη διάταξη του σχήματος 2.2-1 με ηλεκτρόδια τύπου B θα γίνουν μετρήσεις στα 10s για διάφορες τιμές της συνεχούς τάσης και του βάρους των ηλεκτροδίων. (Μεταβάλλεται το βάρος του άνω ηλεκτροδίου τύπου B)

### **2.3.3 Η διαδικασία για τις μετρήσεις αντίστασης επιφάνειας**

Χρησιμοποιώντας τη διάταξη του σχήματος 2.2-2 και για τους δύο τύπους ηλεκτροδίων θα γίνουν μετρήσεις στα 10s για διάφορες τιμές της εφαρμοζόμενης συνεχούς τάσης. Επίσης, θα γίνουν μετρήσεις με βάση το πρότυπο ASTM D257.

## **Κεφάλαιο 3 Αποτελέσματα των μετρήσεων**

### **3.1 Αποτελέσματα μετρήσεων της αντίστασης όγκου**

Ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2 (Παράγραφος 2.3.1) πραγματοποιούμε μετρήσεις στα δοκίμια 1 έως 16 (εκτός του 7 και του 13). Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στους πίνακες που ακολουθούν :

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Αντίσταση όγκου (MΩ)
100	A	10	80,9
200	A	10	74,6
300	A	10	67,1
400	A	10	65,1
500	A	10	62,7
600	A	10	59,6
Κατά ASTM D257 (Τύπος A)			69,9
100	B	10	131,8
200	B	10	119
300	B	10	127
400	B	10	105
500	B	10	104
600	B	10	100
Κατά ASTM D257 (Τύπος B)			101
100	Γ	10	120
200	Γ	10	135
300	Γ	10	131
400	Γ	10	104,3
500	Γ	10	101
600	Γ	10	85,7
Κατά ASTM D257 (Τύπος Γ)			134

**Πίνακας 3.1-1 : Μετρήσεις αντίστασης όγκου για το δοκίμιο 1**

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Αντίσταση Όγκου (GΩ)
100	A	10	2,49
200	A	10	2,56
300	A	10	2,47
400	A	10	2,37
500	A	10	2,35
600	A	10	2,26
Κατά ASTM D257 (Τύπος A)			2,2
100	B	10	4,73
200	B	10	5,38
300	B	10	5,57
400	B	10	5,31
500	B	10	4,73
600	B	10	5,84
Κατά ASTM D257 (Τύπος B)			5,5
100	Γ	10	1,98
200	Γ	10	1,93
300	Γ	10	2,16
400	Γ	10	2,55
500	Γ	10	2,53
600	Γ	10	2,67
Κατά ASTM D257 (Τύπος Γ)			2,47

**Πίνακας 3.1-2** : Μετρήσεις αντίστασης όγκου για το δοκίμιο 2



Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Αντίσταση όγκου (GΩ)
100	A	10	2,96
200	A	10	3,26
300	A	10	3,39
400	A	10	2,95
500	A	10	2,92
600	A	10	2,94
Κατά ASTM D257 (Τύπος A)			2,99
100	B	10	5,78
200	B	10	5,72
300	B	10	5,7
400	B	10	3,91
500	B	10	3,26
600	B	10	3,78
Κατά ASTM D257 (Τύπος B)			4,08
100	Γ	10	4,1
200	Γ	10	3,47
300	Γ	10	3,36
400	Γ	10	1,96
500	Γ	10	2
600	Γ	10	2,16
Κατά ASTM D257 (Τύπος Γ)			2,17

**Πίνακας 3.1-3 :** Μετρήσεις αντίστασης όγκου για το δοκίμιο 3

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Αντίσταση όγκου (GΩ)
100	A	10	46,1
200	A	10	25,4
300	A	10	31,13
400	A	10	70,1
500	A	10	85,9
600	A	10	86,3
Κατά ASTM D257 (Τύπος A)			215
100	B	10	13
200	B	10	6,39
300	B	10	5,74
400	B	10	46,7
500	B	10	63,4
600	B	10	64,9
Κατά ASTM D257 (Τύπος B)			105
100	Γ	10	5,85
200	Γ	10	13,5
300	Γ	10	31,4
400	Γ	10	29,2
500	Γ	10	42,7
600	Γ	10	86,3
Κατά ASTM D257 (Τύπος Γ)			89,5

**Πίνακας 3.1-4 :** Μετρήσεις αντίστασης όγκο για το δοκίμιο 4

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Αντίσταση όγκου (GΩ)
100	A	10	50
200	A	10	>50
300	A	10	74,9
400	A	10	79,4
500	A	10	62,3
600	A	10	73,6
Κατά ASTM D257 (Τύπος A)			138
100	B	10	2,75
200	B	10	863MΩ
300	B	10	1,16
400	B	10	10,3
500	B	10	15,9
600	B	10	19,9
Κατά ASTM D257 (Τύπος B)			40,4
100	Γ	10	>50
200	Γ	10	>50
300	Γ	10	14,7
400	Γ	10	144
500	Γ	10	32,2
600	Γ	10	74,1
Κατά ASTM D257 (Τύπος Γ)			204

**Πίνακας 3.1-5 :** Μετρήσεις αντίστασης όγκου για το δοκίμιο 5

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Αντίσταση Όγκου (GΩ)
100	A	10	7,16
200	A	10	>50
300	A	10	36,4
400	A	10	30,5
500	A	10	30,3
600	A	10	25,1
Κατά ASTM D257 (Τύπος A)			55
100	B	10	12,8
200	B	10	24,5
300	B	10	14,9
400	B	10	13,7
500	B	10	15,9
600	B	10	14,6
Κατά ASTM D257 (Τύπος B)			26,2
100	Γ	10	>50
200	Γ	10	32,2
300	Γ	10	58,9
400	Γ	10	84,3
500	Γ	10	80,4
600	Γ	10	74,9
Κατά ASTM D257 (Τύπος Γ)			212

**Πίνακας 3.1-6 :** Μετρήσεις αντίστασης όγκου για το δοκίμιο 6

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Αντίσταση όγκου (ΜΩ)
100	A	10	123
200	A	10	170
300	A	10	110
400	A	10	100
500	A	10	99,7
600	A	10	71,3
Κατά ASTM D257 (Τύπος A)			86,9
100	B	10	79
200	B	10	68,7
300	B	10	63,2
400	B	10	55,9
500	B	10	127
600	B	10	101
Κατά ASTM D257 (Τύπος B)			148
100	Γ	10	656
200	Γ	10	426
300	Γ	10	377
400	Γ	10	288
500	Γ	10	267
600	Γ	10	178
Κατά ASTM D257 (Τύπος Γ)			192

**Πίνακας 3.1-7 :** Μετρήσεις αντίστασης όγκου για το δοκίμιο 8

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Αντίσταση όγκου (ΜΩ)
100	A	10	305
200	A	10	300
300	A	10	282
400	A	10	263
500	A	10	238
600	A	10	228
Κατά ASTM D257 (Τύπος A)			324
100	B	10	447
200	B	10	444
300	B	10	356
400	B	10	308
500	B	10	253
600	B	10	171
Κατά ASTM D257 (Τύπος B)			350
100	Γ	10	725
200	Γ	10	487
300	Γ	10	554
400	Γ	10	524
500	Γ	10	516
600	Γ	10	506
Κατά ASTM D257 (Τύπος Γ)			266

**Πίνακας 3.1-8 :** Μετρήσεις αντίστασης όγκου για το δοκίμιο 9

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Αντίσταση Όγκου (ΜΩ)
100	A	10	1,02 GΩ
200	A	10	977
300	A	10	882
400	A	10	817
500	A	10	721
600	A	10	651
Κατά ASTM D257 (Τύπος A)			506
100	B	10	625
200	B	10	767
300	B	10	551
400	B	10	259
500	B	10	253
600	B	10	241
Κατά ASTM D257 (Τύπος B)			862
100	Γ	10	2,15GΩ
200	Γ	10	1,8 GΩ
300	Γ	10	1,89 GΩ
400	Γ	10	1,29 GΩ
500	Γ	10	1,14 GΩ
600	Γ	10	1,13 GΩ
Κατά ASTM D257 (Τύπος Γ)			1,1 GΩ

**Πίνακας 3.1-9** : Μετρήσεις αντίστασης όγκου για το δοκίμιο 10

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Αντίσταση Όγκου (GΩ)
100	A	10	1,41
200	A	10	1,3
300	A	10	1,11
400	A	10	1,15
500	A	10	1,05
600	A	10	921MΩ
Κατά ASTM D257 (Τύπος A)			723MΩ
100	B	10	4,48
200	B	10	3,21
300	B	10	1,26
400	B	10	1,47
500	B	10	1,40
600	B	10	764MΩ
Κατά ASTM D257 (Τύπος B)			1,44
100	Γ	10	4,68
200	Γ	10	2,2
300	Γ	10	1,8
400	Γ	10	2,22
500	Γ	10	1,59
600	Γ	10	1,41
Κατά ASTM D257 (Τύπος Γ)			2,08

**Πίνακας 3.1-10** : Μετρήσεις αντίστασης όγκου για το δοκίμιο 11



Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Αντίσταση Όγκου (ΜΩ)
100	A	10	127
200	A	10	135
300	A	10	128
400	A	10	115
500	A	10	114
600	A	10	115
Κατά ASTM D257 ( Τύπος A)			144
100	B	10	122
200	B	10	137
300	B	10	138
400	B	10	158
500	B	10	136
600	B	10	151
Κατά ASTM D257 ( Τύπος B)			169
100	Γ	10	113
200	Γ	10	124
300	Γ	10	135
400	Γ	10	149
500	Γ	10	141
600	Γ	10	135
Κατά ASTM D257 ( Τύπος Γ)			175

**Πίνακας 3.1-11** : Μετρήσεις αντίστασης όγκου για το δοκίμιο 12

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Αντίσταση Όγκου (ΜΩ)
100	A	10	502
200	A	10	485
300	A	10	462
400	A	10	434
500	A	10	421
600	A	10	387
Κατά ASTM D257 (Τύπος A)			411
100	B	10	339
200	B	10	352
300	B	10	310
400	B	10	298
500	B	10	299
600	B	10	295
Κατά ASTM D257 (Τύπος B)			328
100	Γ	10	309
200	Γ	10	330
300	Γ	10	327
400	Γ	10	383
500	Γ	10	340
600	Γ	10	365
Κατά ASTM D257 (Τύπος Γ)			373

**Πίνακας 3.1-12** : Μετρήσεις αντίστασης όγκου για το δοκίμιο 14

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Αντίσταση όγκου (GΩ)
100	A	10	1,96
200	A	10	1,27
300	A	10	1,31
400	A	10	1,24
500	A	10	1,5
600	A	10	1,2
Κατά ASTM D257 (Τύπος A)			1,4
100	B	10	2,46
200	B	10	2,52
300	B	10	2,89
400	B	10	2,96
500	B	10	2,58
600	B	10	2,43
Κατά ASTM D257 (Τύπος B)			2,9
100	Γ	10	12,8
200	Γ	10	11,1
300	Γ	10	9,21
400	Γ	10	10,4
500	Γ	10	8,2
600	Γ	10	7,5
Κατά ASTM D257 (Τύπος Γ)			4,89

**Πίνακας 3.1-13** : Μετρήσεις αντίστασης όγκου για το δοκίμιο 15

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Αντίσταση όγκου (GΩ)
100	A	10	32
200	A	10	21,4
300	A	10	8,2
400	A	10	6
500	A	10	3,84
600	A	10	4,53
Κατά ASTM D257 (Τύπος A)			4,63
100	B	10	>50GΩ
200	B	10	>50GΩ
300	B	10	34,4
400	B	10	13,4
500	B	10	15,1
600	B	10	22
Κατά ASTM D257 (Τύπος B)			23,5
100	Γ	10	11,9
200	Γ	10	15,56
300	Γ	10	15,3
400	Γ	10	10
500	Γ	10	8
600	Γ	10	7,2
Κατά ASTM D257 (Τύπος Γ)			5,24

**Πίνακας 3.1-14 :** Μετρήσεις αντίστασης όγκου για το δοκίμιο 16

### **3.2 Αποτελέσματα μετρήσεων μεταβολής της αντίστασης όγκου με την μεταβολή του βάρους των ηλεκτροδίων**

Χρησιμοποιώντας τη διάταξη του σχήματος 2.2-1 με ηλεκτρόδια τύπου Β πραγματοποιούνται μετρήσεις στα 10s για διάφορες τιμές της συνεχούς τάσης και του βάρους των ηλεκτροδίων ως ακολούθως :

Τάση DC (V)	Βάρος Ηλεκτροδίων (gr)	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Αντίσταση όγκου (MΩ)
100	100	10	130
100	300	10	125
100	600	10	113
100	1100	10	96,3
100	1600	10	92,5
200	100	10	128
200	300	10	128
200	600	10	116
200	1100	10	96
200	1600	10	89,3
400	100	10	130
400	300	10	119
400	600	10	104
400	1100	10	89,2
400	1600	10	83,6
500	100	10	127
500	300	10	113
500	600	10	98,5
500	1100	10	86,8
500	1600	10	81

**Πίνακας 3.2-1 :** Μετρήσεις μεταβολής αντίστασης όγκου του δοκιμίου 1 με τη μεταβολή του βάρους των ηλεκτροδίων

Τάση DC (V)	Βάρος Ηλεκτροδίων (gr)	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Αντίσταση Όγκου (MΩ)
100	100	10	655
100	300	10	600
100	600	10	544
100	1100	10	457
100	1600	10	448
300	100	10	534
300	300	10	493
300	600	10	433
300	1100	10	373
300	1600	10	341
500	100	10	171
500	300	10	144
500	600	10	127
500	1100	10	120
500	1600	10	117

**Πίνακας 3.2-2 :** Μετρήσεις μεταβολής αντίστασης όγκου του δοκιμίου 13 με τη μεταβολή του βάρους των ηλεκτροδίων

### **3.3 Αποτελέσματα μετρήσεων της αντίστασης επιφάνειας**

Ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2 (Παράγραφος 2.3.3) έγιναν μετρήσεις στα εξής δοκίμια : 2,3,4,5,7,11,12,14,15 και 16. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στους πίνακες 3.3-1 έως 3.3-10.

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Αντίσταση επιφάνειας (GΩ)
100	Δ	10	11,4
200	Δ	10	11,2
300	Δ	10	10,7
400	Δ	10	9,79
500	Δ	10	9,67
600	Δ	10	10,1
Κατά ASTM D257 (τύπος Δ)			21,9
100	E	10	21,9
200	E	10	20,5
300	E	10	19,1
400	E	10	18,9
500	E	10	18,2
600	E	10	18,3
Κατά ASTM D257 (τύπος E)			19,3

**Πίνακας 3.3-1 :** Μετρήσεις αντίστασης επιφάνειας για το δοκίμιο 2

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Αντίσταση επιφάνειας (GΩ)
100	Δ	10	8,43
200	Δ	10	7,68
300	Δ	10	8,21
400	Δ	10	7,97
500	Δ	10	7,95
600	Δ	10	7,94
Κατά ASTM D257 (τύπος Δ)			8,84
100	E	10	5,25
200	E	10	5,32
300	E	10	5,21
400	E	10	5,27
500	E	10	5,94
600	E	10	5,84
Κατά ASTM D257 (τύπος E)			6,5

**Πίνακας 3.3-2 :** Μετρήσεις αντίστασης επιφάνειας για το δοκίμιο 3

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Αντίσταση επιφάνειας (GΩ)
100	Δ	10	>50
200	Δ	10	>50
300	Δ	10	111
400	Δ	10	110
500	Δ	10	102
600	Δ	10	139
Κατά ASTM D257 (τύπος Δ)			250
100	E	10	>50
200	E	10	>50
300	E	10	>250
400	E	10	>250
500	E	10	>250
600	E	10	>250
Κατά ASTM D257 (τύπος E)			>250

**Πίνακας 3.3-3 :** Μετρήσεις αντίστασης επιφάνειας για το δοκίμιο 4

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Αντίσταση επιφάνειας (GΩ)
100	Δ	10	>50
200	Δ	10	>50
300	Δ	10	>250
400	Δ	10	235
500	Δ	10	197
600	Δ	10	>250
Κατά ASTM D257 (τύπος Δ)			>250
100	E	10	>50
200	E	10	>250
300	E	10	>250
400	E	10	>250
500	E	10	204
600	E	10	228
Κατά ASTM D257 (τύπος E)			>250

**Πίνακας 3.3-4 :** Μετρήσεις αντίστασης επιφάνειας για το δοκίμιο 5



Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Αντίσταση επιφάνειας (GΩ)
100	Δ	10	9,28
200	Δ	10	8,92
300	Δ	10	9,1
400	Δ	10	8,48
500	Δ	10	8,2
600	Δ	10	7,48
Κατά ASTM D257 (τύπος Δ)			8,36
100	E	10	9,7
200	E	10	9,26
300	E	10	9,15
400	E	10	9,2
500	E	10	8,53
600	E	10	7,68
Κατά ASTM D257 (τύπος E)			9,43

**Πίνακας 3.3-5 :** Μετρήσεις αντίστασης επιφάνειας για το δοκίμιο 7

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Αντίσταση επιφάνειας (GΩ)
100	Δ	10	22,3
200	Δ	10	20,4
300	Δ	10	19,1
400	Δ	10	18,4
500	Δ	10	16,9
600	Δ	10	15,6
Κατά ASTM D257 (τύπος Δ)			19,6
100	E	10	15,2
200	E	10	14,4
300	E	10	11,4
400	E	10	10,8
500	E	10	9,33
600	E	10	8,86
Κατά ASTM D257 (τύπος E)			10,5

**Πίνακας 3.3-6 :** Μετρήσεις αντίστασης επιφάνειας για το δοκίμιο 11

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Αντίσταση επιφάνειας (GΩ)
100	Δ	10	36,9
200	Δ	10	30,3
300	Δ	10	27,5
400	Δ	10	24,8
500	Δ	10	23,3
600	Δ	10	20
Κατά ASTM D257 (τύπος Δ)			28,3
100	E	10	25,4
200	E	10	20,5
300	E	10	18,8
400	E	10	16,3
500	E	10	15,3
600	E	10	13,8
Κατά ASTM D257 (τύπος E)			21,2

**Πίνακας 3.3-7 :** Μετρήσεις αντίστασης επιφάνειας για το δοκίμιο 12

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Αντίσταση επιφάνειας (GΩ)
100	Δ	10	16,7
200	Δ	10	15,8
300	Δ	10	15,6
400	Δ	10	15,9
500	Δ	10	15,5
600	Δ	10	15,7
Κατά ASTM D257 (τύπος Δ)			16,6
100	E	10	27,8
200	E	10	23
300	E	10	21,6
400	E	10	19,7
500	E	10	19,5
600	E	10	20
Κατά ASTM D257 (τύπος E)			22,6

**Πίνακας 3.3-8 :** Μετρήσεις αντίστασης επιφάνειας για το δοκίμιο 14

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Αντίσταση επιφάνειας (GΩ)
100	Δ	10	>50
200	Δ	10	>50
300	Δ	10	68,4
400	Δ	10	65,3
500	Δ	10	64
600	Δ	10	77,9
Κατά ASTM D257 (τύπος Δ)			114
100	E	10	>50
200	E	10	>50
300	E	10	122
400	E	10	69,1
500	E	10	68,7
600	E	10	75
Κατά ASTM D257 (τύπος E)			104

**Πίνακας 3.3-9 :** Μετρήσεις αντίστασης επιφάνειας για το δοκίμιο 15

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Αντίσταση επιφάνειας (GΩ)
100	Δ	10	>50
200	Δ	10	>50
300	Δ	10	47,5
400	Δ	10	59,8
500	Δ	10	75,9
600	Δ	10	71,2
Κατά ASTM D257 (Δ)			95,3
100	E	10	>50
200	E	10	>50
300	E	10	>250
400	E	10	>250
500	E	10	>250
600	E	10	>250
Κατά ASTM D257 (τύπος E)			>250

**Πίνακας 3.3-10 :** Μετρήσεις αντίστασης επιφάνειας για το δοκίμιο 16



## Κεφάλαιο 4 Επεξεργασία των μετρήσεων και σχόλια επί των αποτελεσμάτων

### 4.1 Επεξεργασία των μετρήσεων

Για κάθε μέτρηση αντίστασης του όγκου υπολογίζουμε την ειδική αντίσταση όγκου βάση του τύπου  $\rho_v = R \cdot A / \lambda$  ( $\Omega \text{ cm}$ ), όπου  $A$  το εμβαδόν διατομής της επιφάνειας επαφής του ηλεκτροδίου και  $\lambda$  το πάχος του υλικού.

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Ειδική Αντίσταση όγκου ( $\Omega \text{ cm}$ )
100	A	10	$25,42 \cdot 10^9$
200	A	10	$23,44 \cdot 10^9$
300	A	10	$21,08 \cdot 10^9$
400	A	10	$20,46 \cdot 10^9$
500	A	10	$19,7 \cdot 10^9$
600	A	10	$18,73 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 (Τύπος A)			$21,96 \cdot 10^9$
100	B	10	$26,5 \cdot 10^9$
200	B	10	$23,93 \cdot 10^9$
300	B	10	$25,53 \cdot 10^9$
400	B	10	$21,11 \cdot 10^9$
500	B	10	$20,91 \cdot 10^9$
600	B	10	$20,11 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 (Τύπος B)			$20,31 \cdot 10^9$
100	Γ	10	$14,73 \cdot 10^9$
200	Γ	10	$16,57 \cdot 10^9$
300	Γ	10	$16,08 \cdot 10^9$
400	Γ	10	$12,82 \cdot 10^9$
500	Γ	10	$12,4 \cdot 10^9$
600	Γ	10	$10,52 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 (Τύπος Γ)			$16,44 \cdot 10^9$

**Πίνακας 4.1-1 :** Υπολογισμός της ειδικής αντίστασης όγκου για το δοκίμιο 1

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Ειδική Αντίσταση όγκου ( $\Omega\text{cm}$ )
100	A	10	$284,43 \cdot 10^9$
200	A	10	$292,42 \cdot 10^9$
300	A	10	$282,15 \cdot 10^9$
400	A	10	$270,72 \cdot 10^9$
500	A	10	$2,68,44 \cdot 10^9$
600	A	10	$2,58,16 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 (Τύπος A)			$251,3 \cdot 10^9$
100	B	10	$345,83 \cdot 10^9$
200	B	10	$393,35 \cdot 10^9$
300	B	10	$407,24 \cdot 10^9$
400	B	10	$388,23 \cdot 10^9$
500	B	10	$345,83 \cdot 10^9$
600	B	10	$426,99 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 (Τύπος B)			$402,1 \cdot 10^9$
100	Γ	10	$88,34 \cdot 10^9$
200	Γ	10	$86,11 \cdot 10^9$
300	Γ	10	$96,34 \cdot 10^9$
400	Γ	10	$113,77 \cdot 10^9$
500	Γ	10	$112,88 \cdot 10^9$
600	Γ	10	$119,12 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 (Τύπος Γ)			$110,2 \cdot 10^9$

**Πίνακας 4.1-2 :** Υπολογισμός της ειδικής αντίστασης όγκου για το δοκίμιο 2

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Ειδική Αντίσταση όγκου ( $\Omega\text{cm}$ )
100	A	10	$247,99 \cdot 10^9$
200	A	10	$273,12 \cdot 10^9$
300	A	10	$2,84,01 \cdot 10^9$
400	A	10	$247,15 \cdot 10^9$
500	A	10	$244,64 \cdot 10^9$
600	A	10	$246,31 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 (Τύπος A)			$250,5 \cdot 10^9$
100	B	10	$310 \cdot 10^9$
200	B	10	$306,75 \cdot 10^9$
300	B	10	$305,68 \cdot 10^9$
400	B	10	$209,71 \cdot 10^9$
500	B	10	$16,45 \cdot 10^9$
600	B	10	$202,71 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 (Τύπος B)			$218,8 \cdot 10^9$
100	Γ	10	$134,15 \cdot 10^9$
200	Γ	10	$113,54 \cdot 10^9$
300	Γ	10	$109,94 \cdot 10^9$
400	Γ	10	$64,13 \cdot 10^9$
500	Γ	10	$65,44 \cdot 10^9$
600	Γ	10	$70,67 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 (Τύπος Γ)			$71 \cdot 10^9$

**Πίνακας 4.1-3 :** Υπολογισμός της ειδικής αντίστασης όγκου για το δοκίμιο 3

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Ειδική Αντίσταση όγκου ( $\Omega\text{cm}$ )
100	A	10	$38,62 \cdot 10^{12}$
200	A	10	$21,28 \cdot 10^{12}$
300	A	10	$26,08 \cdot 10^{12}$
400	A	10	$58,73 \cdot 10^{12}$
500	A	10	$71,96 \cdot 10^{12}$
600	A	10	$72,3 \cdot 10^{12}$
Κατά ASTM D257 (Τύπος A)			$1,8 \cdot 10^{14}$
100	B	10	$6,97 \cdot 10^{12}$
200	B	10	$3,43 \cdot 10^{12}$
300	B	10	$3,08 \cdot 10^{12}$
400	B	10	$25,04 \cdot 10^{12}$
500	B	10	$34 \cdot 10^{12}$
600	B	10	$34,79 \cdot 10^{12}$
Κατά ASTM D257 (Τύπος B)			$56,3 \cdot 10^{12}$
100	Γ	10	$1,92 \cdot 10^{12}$
200	Γ	10	$4,42 \cdot 10^{12}$
300	Γ	10	$10,28 \cdot 10^{12}$
400	Γ	10	$9,55 \cdot 10^{12}$
500	Γ	10	$13,98 \cdot 10^{12}$
600	Γ	10	$28,25 \cdot 10^{12}$
Κατά ASTM D257 (Τύπος Γ)			$29,3 \cdot 10^{12}$

**Πίνακας 4.1-4 :** Υπολογισμός της ειδικής αντίστασης όγκου για το δοκίμιο 4



Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Ειδική Αντίσταση όγκου ( $\Omega\text{cm}$ )
100	A	10	$31,41 \cdot 10^{12}$
200	A	10	-
300	A	10	$47,06 \cdot 10^{12}$
400	A	10	$49,88 \cdot 10^{12}$
500	A	10	$39,14 \cdot 10^{12}$
600	A	10	$46,24 \cdot 10^{12}$
Κατά ASTM D257 (Τύπος A)			$86,7 \cdot 10^{12}$
100	B	10	$1,1 \cdot 10^{12}$
200	B	10	$3,47 \cdot 10^{11}$
300	B	10	$4,66 \cdot 10^{11}$
400	B	10	$4,14 \cdot 10^{12}$
500	B	10	$6,39 \cdot 10^{12}$
600	B	10	$8 \cdot 10^{12}$
Κατά ASTM D257 (Τύπος B)			$16,24 \cdot 10^{12}$
100	Γ	10	-
200	Γ	10	-
300	Γ	10	$3,61 \cdot 10^{12}$
400	Γ	10	$32,34 \cdot 10^{12}$
500	Γ	10	$7,9 \cdot 10^{12}$
600	Γ	10	$18,19 \cdot 10^{12}$
Κατά ASTM D257 (Τύπος Γ)			$50,07 \cdot 10^{12}$

**Πίνακας 4.1-5 :** Υπολογισμός της ειδικής αντίστασης όγκου για το δοκίμιο 5

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Ειδική Αντίσταση όγκου ( $\Omega\text{cm}$ )
100	A	10	$3,1 \cdot 10^{12}$
200	A	10	-
300	A	10	$15,77 \cdot 10^{12}$
400	A	10	$13,22 \cdot 10^{12}$
500	A	10	$13,13 \cdot 10^{12}$
600	A	10	$10,88 \cdot 10^{12}$
Κατά ASTM D257 (Τύπος A)			$23,83 \cdot 10^{12}$
100	B	10	$2,15 \cdot 10^{12}$
200	B	10	$4,12 \cdot 10^{12}$
300	B	10	$2,51 \cdot 10^{12}$
400	B	10	$2,31 \cdot 10^{12}$
500	B	10	$2,68 \cdot 10^{12}$
600	B	10	$2,46 \cdot 10^{12}$
Κατά ASTM D257 (Τύπος B)			$4,41 \cdot 10^{12}$
100	Γ	10	-
200	Γ	10	$5,45 \cdot 10^{12}$
300	Γ	10	$9,97 \cdot 10^{12}$
400	Γ	10	$14,27 \cdot 10^{12}$
500	Γ	10	$13,61 \cdot 10^{12}$
600	Γ	10	$12,68 \cdot 10^{12}$
Κατά ASTM D257 (Τύπος Γ)			$35,88 \cdot 10^{12}$

**Πίνακας 4.1-6 :** Υπολογισμός της ειδικής αντίστασης όγκου για το δοκίμιο 6

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Ειδική Αντίσταση όγκου ( $\Omega\text{cm}$ )
100	A	10	$94,19 \cdot 10^9$
200	A	10	$130,18 \cdot 10^9$
300	A	10	$84,24 \cdot 10^9$
400	A	10	$76,58 \cdot 10^9$
500	A	10	$62,64 \cdot 10^9$
600	A	10	$44,8 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 (Τύπος A)			$54,6 \cdot 10^9$
100	B	10	$31,77 \cdot 10^9$
200	B	10	$27,62 \cdot 10^9$
300	B	10	$25,41 \cdot 10^9$
400	B	10	$24,48 \cdot 10^9$
500	B	10	$51,07 \cdot 10^9$
600	B	10	$40,61 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 (Τύπος B)			$59,51 \cdot 10^9$
100	Γ	10	$161 \cdot 10^9$
200	Γ	10	$104,55 \cdot 10^9$
300	Γ	10	$92,52 \cdot 10^9$
400	Γ	10	$70,68 \cdot 10^9$
500	Γ	10	$65,53 \cdot 10^9$
600	Γ	10	$43,68 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 (Τύπος Γ)			$47,12 \cdot 10^9$

**Πίνακας 4.1-7 :** Υπολογισμός της ειδικής αντίστασης όγκου για το δοκίμιο 8

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Ειδική Αντίσταση όγκου ( $\Omega\text{cm}$ )
100	A	10	$38,33 \cdot 10^9$
200	A	10	$37,7 \cdot 10^9$
300	A	10	$35,44 \cdot 10^9$
400	A	10	$33,05 \cdot 10^9$
500	A	10	$29,91 \cdot 10^9$
600	A	10	$28,65 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 (Τύπος A)			$40,72 \cdot 10^9$
100	B	10	$35,88 \cdot 10^9$
200	B	10	$35,65 \cdot 10^9$
300	B	10	$28,58 \cdot 10^9$
400	B	10	$24,73 \cdot 10^9$
500	B	10	$20,31 \cdot 10^9$
600	B	10	$13,73 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 (Τύπος B)			$28,1 \cdot 10^9$
100	Γ	10	$35,7 \cdot 10^9$
200	Γ	10	$23,84 \cdot 10^9$
300	Γ	10	$27,12 \cdot 10^9$
400	Γ	10	$25,65 \cdot 10^9$
500	Γ	10	$25,26 \cdot 10^9$
600	Γ	10	$24,77 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 (Τύπος Γ)			$13,1 \cdot 10^9$

**Πίνακας 4.1-8 :** Υπολογισμός της ειδικής αντίστασης όγκου για το δοκίμιο 9

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Ειδική Αντίσταση όγκου ( $\Omega\text{cm}$ )
100	A	10	$427,26 \cdot 10^9$
200	A	10	$409,34 \cdot 10^9$
300	A	10	$369,53 \cdot 10^9$
400	A	10	$342,3 \cdot 10^9$
500	A	10	$302,08 \cdot 10^9$
600	A	10	$272,75 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 (Τύπος A)			$212 \cdot 10^9$
100	B	10	$167,49 \cdot 10^9$
200	B	10	$205,54 \cdot 10^9$
300	B	10	$147,66 \cdot 10^9$
400	B	10	$69,41 \cdot 10^9$
500	B	10	$67,8 \cdot 10^9$
600	B	10	$64,58 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 (Τύπος B)			$231 \cdot 10^9$
100	Γ	10	$327,36 \cdot 10^9$
200	Γ	10	$274,07 \cdot 10^9$
300	Γ	10	$287,78 \cdot 10^9$
400	Γ	10	$196,42 \cdot 10^9$
500	Γ	10	$173,59 \cdot 10^9$
600	Γ	10	$172,06 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 (Τύπος Γ)			$180 \cdot 10^9$

**Πίνακας 4.1-9** : Υπολογισμός της ειδικής αντίστασης όγκου για το δοκίμιο 10

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Ειδική Αντίσταση όγκου ( $\Omega\text{cm}$ )
100	A	10	$442,7 \cdot 10^9$
200	A	10	$408,16 \cdot 10^9$
300	A	10	$348,5 \cdot 10^9$
400	A	10	$361,07 \cdot 10^9$
500	A	10	$329,67 \cdot 10^9$
600	A	10	$289,17 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 (Τύπος A)			$227 \cdot 10^9$
100	B	10	$900,67 \cdot 10^9$
200	B	10	$645,34 \cdot 10^9$
300	B	10	$253,31 \cdot 10^9$
400	B	10	$295,53 \cdot 10^9$
500	B	10	$281,46 \cdot 10^9$
600	B	10	$153,6 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 (Τύπος B)			$289,5 \cdot 10^9$
100	Γ	10	$574,2 \cdot 10^9$
200	Γ	10	$269,92 \cdot 10^9$
300	Γ	10	$220,85 \cdot 10^9$
400	Γ	10	$272,24 \cdot 10^9$
500	Γ	10	$195,08 \cdot 10^9$
600	Γ	10	$173 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 (Τύπος Γ)			$255,2 \cdot 10^9$

**Πίνακας 4.1-10** : Υπολογισμός της ειδικής αντίστασης όγκου για το δοκίμιο 11

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Ειδική Αντίσταση όγκου ( $\Omega\text{cm}$ )
100	A	10	$79,82 \cdot 10^9$
200	A	10	$84,84 \cdot 10^9$
300	A	10	$80,44 \cdot 10^9$
400	A	10	$72,27 \cdot 10^9$
500	A	10	$71,65 \cdot 10^9$
600	A	10	$72,27 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 ( Τύπος A)			$90,5 \cdot 10^9$
100	B	10	$49,09 \cdot 10^9$
200	B	10	$55,12 \cdot 10^9$
300	B	10	$55,53 \cdot 10^9$
400	B	10	$63,57 \cdot 10^9$
500	B	10	$54,72 \cdot 10^9$
600	B	10	$60,76 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 ( Τύπος B)			$68 \cdot 10^9$
100	Γ	10	$27,77 \cdot 10^9$
200	Γ	10	$30,47 \cdot 10^9$
300	Γ	10	$33,17 \cdot 10^9$
400	Γ	10	$36,61 \cdot 10^9$
500	Γ	10	$34,65 \cdot 10^9$
600	Γ	10	$33,17 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 ( Τύπος Γ)			$43 \cdot 10^9$

**Πίνακας 4.1-11** : Υπολογισμός της ειδικής αντίστασης όγκου για το δοκίμιο 12

Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Ειδική Αντίσταση όγκου ( $\Omega\text{cm}$ )
100	A	10	$257,68 \cdot 10^9$
200	A	10	$152,34 \cdot 10^9$
300	A	10	$145,12 \cdot 10^9$
400	A	10	$136,32 \cdot 10^9$
500	A	10	$132,24 \cdot 10^9$
600	A	10	$124,56 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 (Τύπος A)			$129,1 \cdot 10^9$
100	B	10	$68,21 \cdot 10^9$
200	B	10	$70,83 \cdot 10^9$
300	B	10	$62,38 \cdot 10^9$
400	B	10	$59,96 \cdot 10^9$
500	B	10	$60,16 \cdot 10^9$
600	B	10	$59,36 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 (Τύπος B)			$66 \cdot 10^9$
100	Γ	10	$37,94 \cdot 10^9$
200	Γ	10	$40,52 \cdot 10^9$
300	Γ	10	$40,15 \cdot 10^9$
400	Γ	10	$47,03 \cdot 10^9$
500	Γ	10	$41,75 \cdot 10^9$
600	Γ	10	$44,82 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 (Τύπος Γ)			$45,8 \cdot 10^9$

**Πίνακας 4.1-12 :** Υπολογισμός της ειδικής αντίστασης όγκου για το δοκίμιο 14



Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος Εφαρμογής (sec)	Ειδική Αντίσταση όγκου ( $\Omega\text{cm}$ )
100	A	10	$1,03 \cdot 10^{12}$
200	A	10	$664,94 \cdot 10^9$
300	A	10	$685,88 \cdot 10^9$
400	A	10	$649,23 \cdot 10^9$
500	A	10	$785,36 \cdot 10^9$
600	A	10	$628,29 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 (Τύπος A)			$733 \cdot 10^9$
100	B	10	$8,24,35 \cdot 10^9$
200	B	10	$844,46 \cdot 10^9$
300	B	10	$968,45 \cdot 10^9$
400	B	10	$991,9 \cdot 10^9$
500	B	10	$864,57 \cdot 10^9$
600	B	10	$814,3 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 (Τύπος B)			$971,8 \cdot 10^9$
100	Γ	10	$2,6 \cdot 10^{12}$
200	Γ	10	$2,26 \cdot 10^{12}$
300	Γ	10	$1,87 \cdot 10^{12}$
400	Γ	10	$2,11 \cdot 10^{12}$
500	Γ	10	$1,67 \cdot 10^{12}$
600	Γ	10	$1,52 \cdot 10^{12}$
Κατά ASTM D257 (Τύπος Γ)			$994 \cdot 10^9$

**Πίνακας 4.1-13** : Υπολογισμός της ειδικής αντίστασης όγκου για το δοκίμιο 15

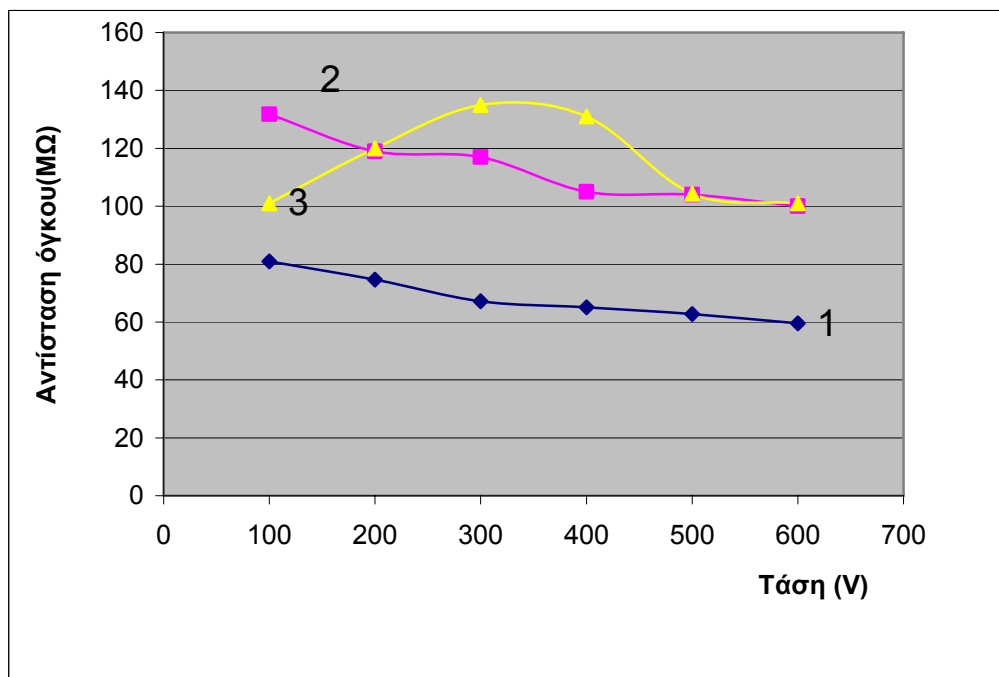
Τάση DC (V)	Τύπος Ηλεκτροδίων	Χρόνος εφαρμογής (sec)	Ειδική Αντίσταση όγκου ( $\Omega\text{cm}$ )
100	A	10	$9,54 \cdot 10^{12}$
200	A	10	$6,38 \cdot 10^{12}$
300	A	10	$2,44 \cdot 10^{12}$
400	A	10	$1,79 \cdot 10^{12}$
500	A	10	$1,14 \cdot 10^{12}$
600	A	10	$1,35 \cdot 10^{12}$
Κατά ASTM D257 (Τύπος A)			$1,38 \cdot 10^{12}$
100	B	10	-
200	B	10	-
300	B	10	$6,59 \cdot 10^{12}$
400	B	10	$2,57 \cdot 10^{12}$
500	B	10	$2,89 \cdot 10^{12}$
600	B	10	$4,21 \cdot 10^{12}$
Κατά ASTM D257 (Τύπος B)			$4,5 \cdot 10^{12}$
100	Γ	10	$1,39 \cdot 10^{12}$
200	Γ	10	$1,82 \cdot 10^{12}$
300	Γ	10	$1,79 \cdot 10^{12}$
400	Γ	10	$1,17 \cdot 10^{12}$
500	Γ	10	$934,96 \cdot 10^9$
600	Γ	10	$841,47 \cdot 10^9$
Κατά ASTM D257 (Τύπος Γ)			$612,4 \cdot 10^9$

**Πίνακας 4.1-14 :** Υπολογισμός της ειδικής αντίστασης όγκου για το δοκίμιο 16

Όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2, η ειδική αντίσταση επιφάνειας των δοκιμίων χρησιμοποιώντας τη διάταξη του σχήματος 2.2-2 ισούται με την αντίσταση επιφάνειας αυτών.

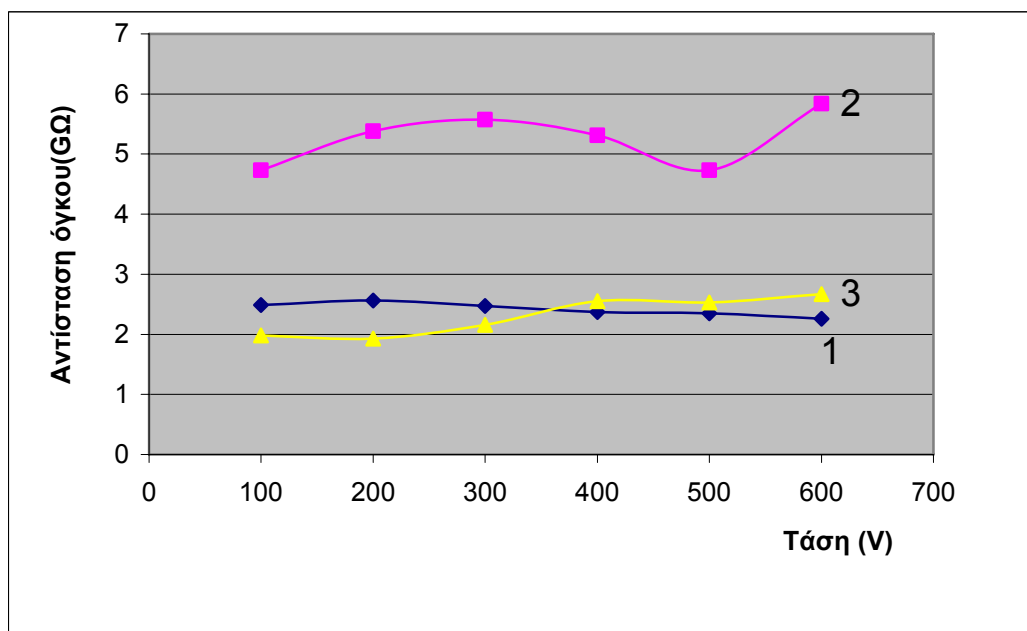
#### **4.2 Μετρήσεις αντίστασης όγκου**

Από τα στοιχεία των πινάκων 3.1-1 έως 3.1-14 (εκτός από τους 3.1-5 και 3.1-6 καθώς ορισμένες τιμές της αντίστασης ήταν μη μετρήσιμες από το όργανο μέτρησης) προκύπτουν αντίστοιχα οι χαρακτηριστικές αντίστασης όγκου – τάσης για το χρονικό διάστημα των 10s σύμφωνα με τα σχήματα 4.2.1 έως 4.2-12.



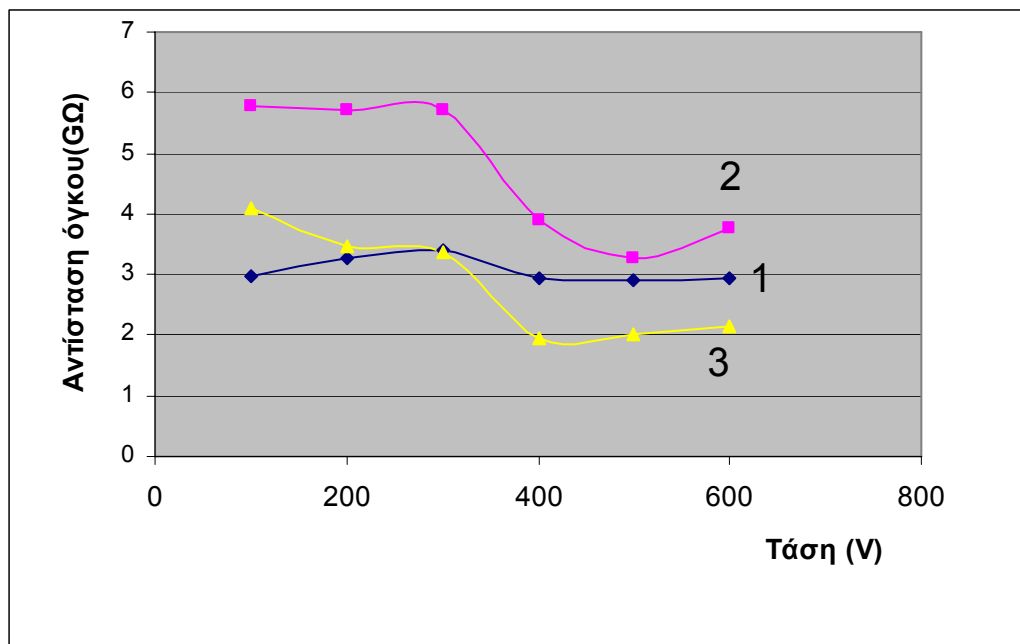
**Σχήμα 4.2-1** : Μεταβολή αντίστασης όγκου με τη μεταβολή της τάσης για το δοκίμιο 1

- 1 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Α
- 2 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Β
- 3 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Γ



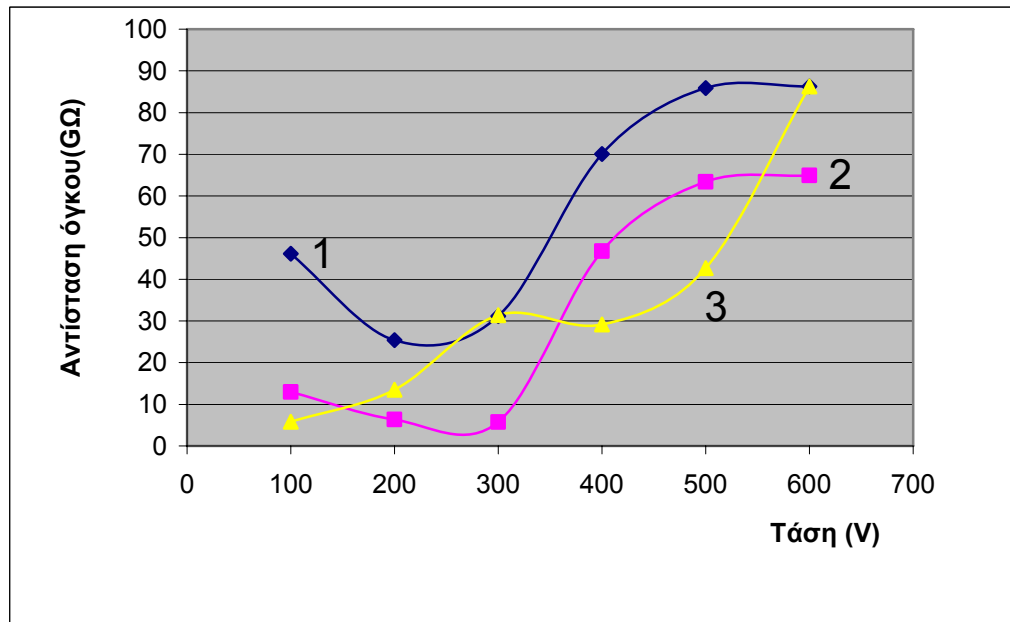
**Σχήμα 4.2-2** : Μεταβολή αντίστασης όγκου με τη μεταβολή της τάσης για το δοκίμιο 2

- 1 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Α
- 2 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Β
- 3 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Γ



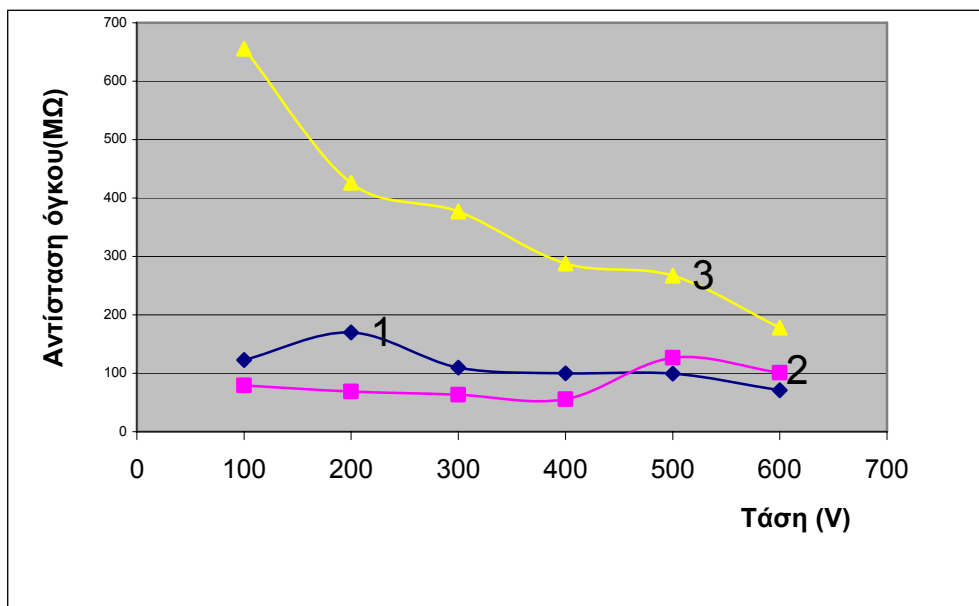
**Σχήμα 4.2-3 :** Μεταβολή αντίστασης όγκου με τη μεταβολή της τάσης για το δοκίμιο 3

- 1 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Α
- 2 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Β
- 3 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Γ



**Σχήμα 4.2-4 :** Μεταβολή αντίστασης όγκου με τη μεταβολή της τάσης για το δοκίμιο 4

- 1 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Α
- 2 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Β
- 3 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Γ

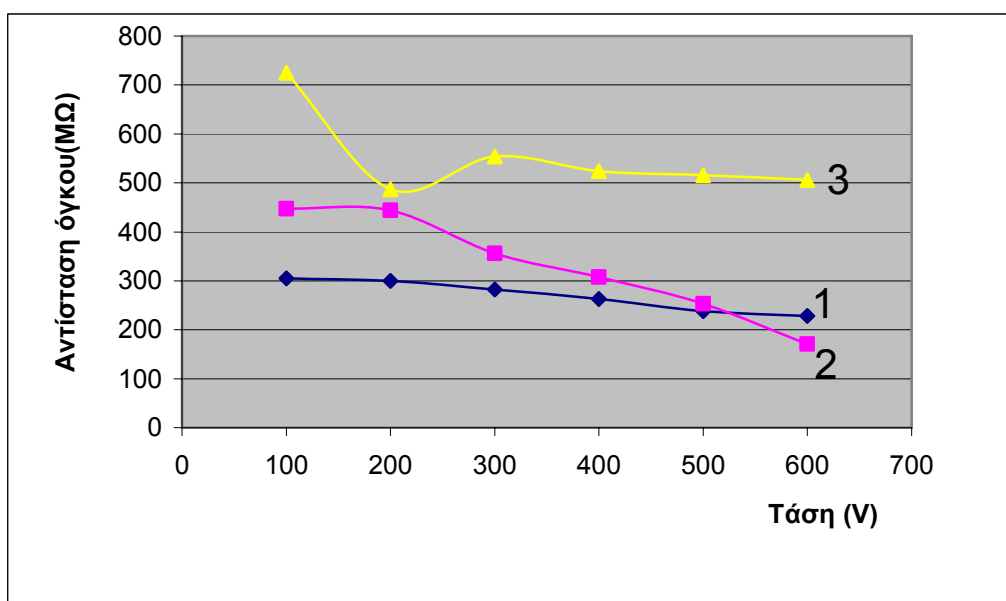


**Σχήμα 4.2-5 :** Μεταβολή αντίστασης όγκου με τη μεταβολή της τάσης για το δοκίμιο 8

1 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Α

2 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Β

3 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Γ

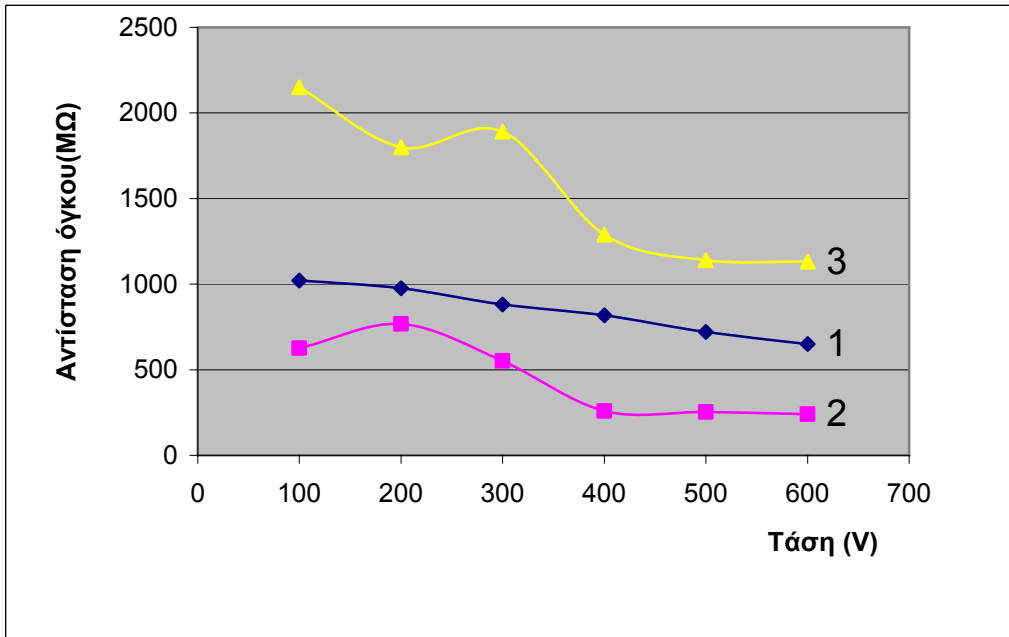


**Σχήμα 4.2-6 :** Μεταβολή αντίστασης όγκου με τη μεταβολή της τάσης για το δοκίμιο 9

1 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Α

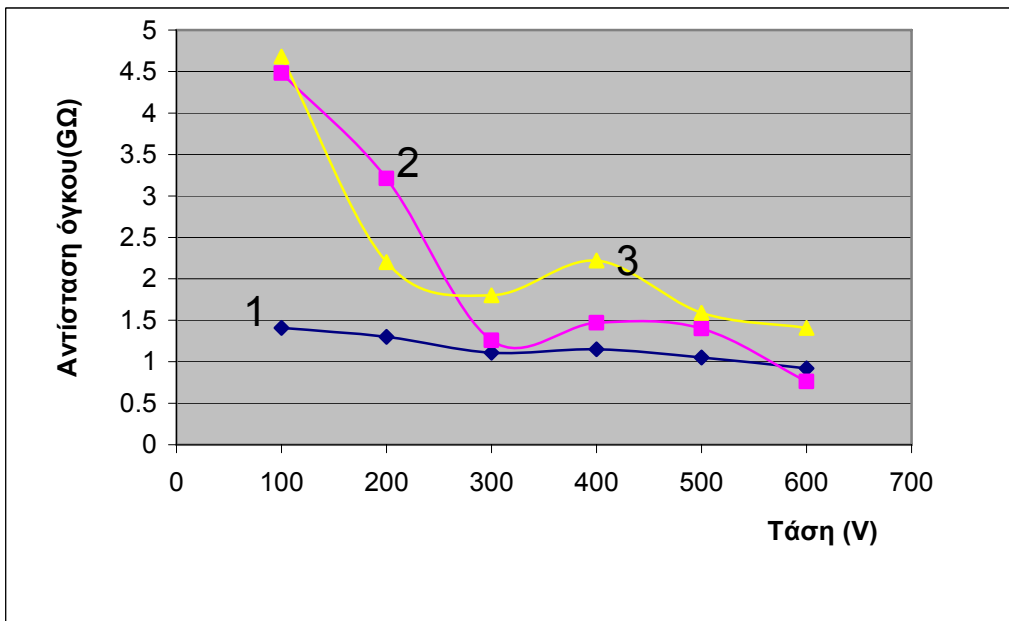
2 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Β

3 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Γ



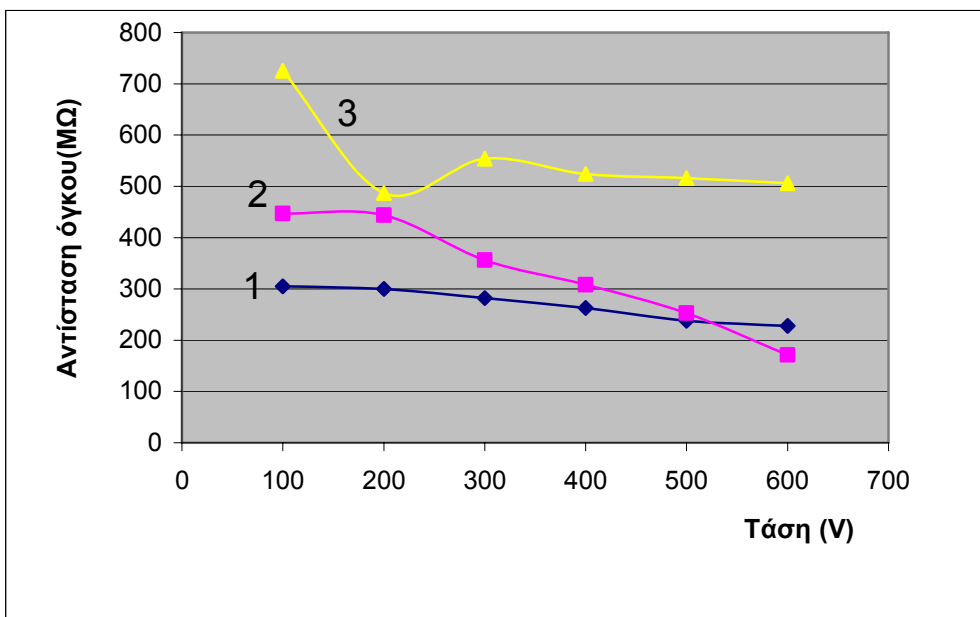
**Σχήμα 4.2-7 :** Μεταβολή αντίστασης όγκου με τη μεταβολή της τάσης για το δοκίμιο 10

- 1 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Α
- 2 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Β
- 3 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Γ



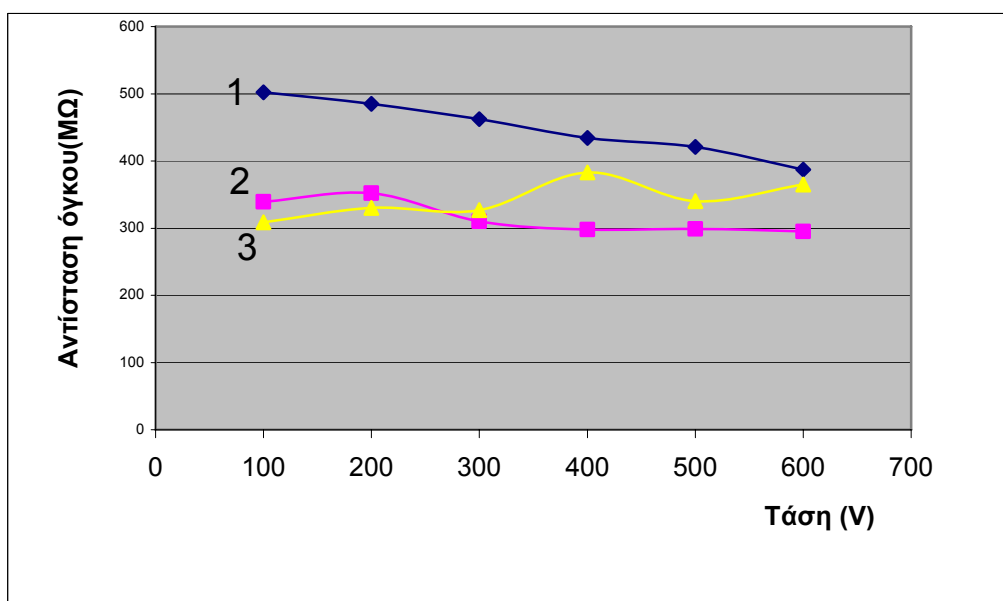
**Σχήμα 4.2-8 :** Μεταβολή αντίστασης όγκου με τη μεταβολή της τάσης για το δοκίμιο 11

- 1 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Α
- 2 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Β
- 3 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Γ



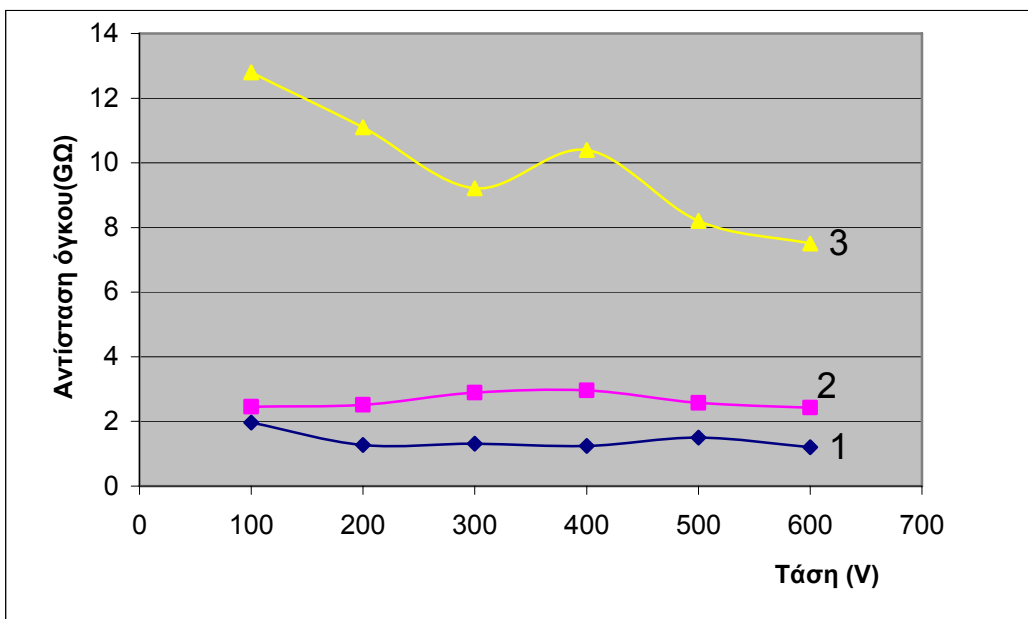
**Σχήμα 4.2-9 :** Μεταβολή αντίστασης όγκου με τη μεταβολή της τάσης για το δοκίμιο 12

- 1 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Α
- 2 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Β
- 3 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Γ



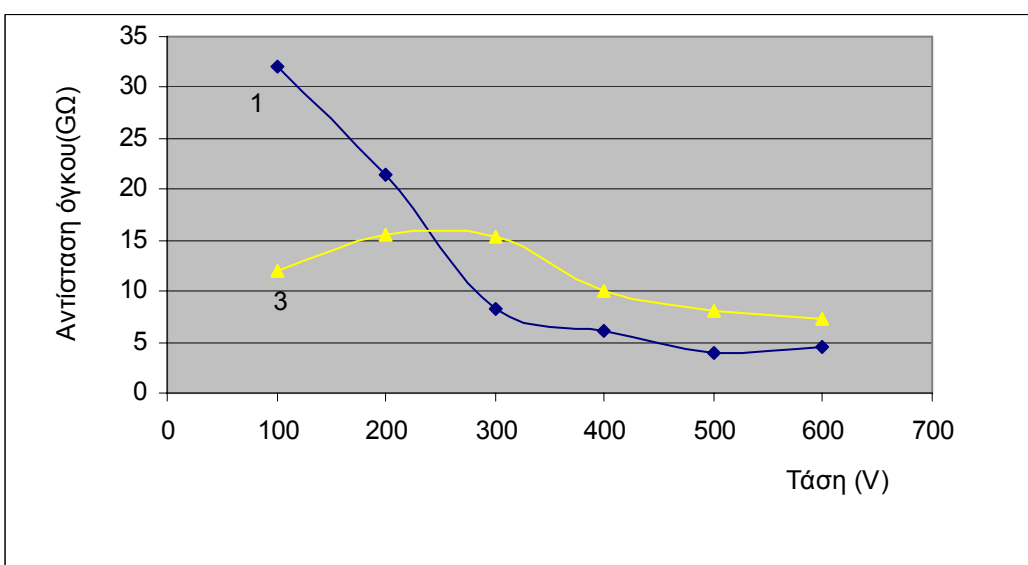
**Σχήμα 4.2-10 :** Μεταβολή αντίστασης όγκου με τη μεταβολή της τάσης για το δοκίμιο 14

- 1 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Α
- 2 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Β
- 3 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Γ



**Σχήμα 4.2-11 :** Μεταβολή αντίστασης όγκου με τη μεταβολή της τάσης για το δοκίμιο 15

- 1 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Α
- 2 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Β
- 3 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Γ



**Σχήμα 4.2-12 :** Μεταβολή αντίστασης όγκου με τη μεταβολή της τάσης για το δοκίμιο 16

- 1 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Α
- 2 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Β
- 3 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Γ

Με την αύξηση της τάσης που εφαρμόζεται στο διηλεκτρικό για το χρονικό διάστημα των 10 δευτερολέπτων, παρατηρείται μείωση της τιμής της μετρούμενης αντίστασης. Όπως



φαίνεται λοιπόν και από τις γραφικές παραστάσεις (σχήματα 4.2-1 ως 4.2-12) η αντίσταση μόνωσης μειώνεται με την αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης.

Από τους πίνακες αντίστασης όγκου βλέπουμε ότι με την αύξηση του πάχους του διηλεκτρικού υλικού, αυξάνεται η μετρούμενη αντίσταση. Αυτό συμφωνεί και με τη θεωρία διότι όταν στην διάταξη αυξάνεται το πάχος είναι σαν να έχει προστεθεί αντίσταση σε σειρά.

Από τον τύπο της ειδικής αντίστασης όγκου  $\rho_v = R \cdot A/\lambda$  αναμένεται η αντίσταση που θα μετρήσουμε με το ηλεκτρόδιο μικρότερου εμβαδού  $A$  να είναι μεγαλύτερη, έτσι ώστε η ειδική αντίσταση όγκου να είναι σταθερή. Εντούτοις, αυτό δεν συμφωνεί πάντα με τις μετρήσεις στους πίνακες. Αυτό οφείλεται στην καλύτερη εφαρμογή και στην σταθερότητα της διάταξης με το μεγαλύτερης διατομής ηλεκτρόδιο. Οι μετρήσεις με το μικρότερου διατομής ηλεκτρόδιο (τύπου Γ) παρουσιάζουν την μεγαλύτερη μη ομαλότητα.

Σε όλα τα δοκίμια παρατηρήθηκε ότι αυξάνεται η αντίσταση με την πάροδο του χρόνου και σε μια τιμή σταθεροποιείται. Η αύξηση αυτή εξηγείται από την μείωση των χωρικών ρευμάτων και ρευμάτων απορρόφησης στο υλικό με την πάροδο του χρόνου (βλ. 1.13.1 Εξάρτηση αντίσταση μόνωσης από το ρεύμα). Ειδικά τα υλικά B,Z και H παρουσίασαν μια ταχύτερη αύξηση της αντίστασης με το χρόνο. Αυτά τα δοκίμια απαιτούσαν περισσότερο χρόνο για τη σταθεροποίηση της αντίστασης τους.

Παρατηρήσαμε επίσης ότι τα υλικά B,Z και H παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη μονωτική ικανότητα από το σύνολο των δοκιμίων αφού οι μετρούμενες αντιστάσεις τους ήταν πολύ μεγαλύτερες από τα υπόλοιπα.

Κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων παρατηρήθηκαν τα εξής σφάλματα :

-Σφάλμα λόγω της μη σταθερότητας της διάταξης. Τα κυκλικής επιφάνειας ηλεκτρόδια δεν εφάρμοζαν πάντα ακριβώς στην επιφάνεια των δοκιμίων.

-Αδυναμία οργάνου να μετρήσει τις πολύ υψηλές αντιστάσεις. Το όργανο METRISO 5000D-PI 5000V που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της αντίστασης μπορεί να μετρήσει μέχρι τα 50GΩ για dc τάσεις από 100 ως 250V, ως 250GΩ για dc τάσεις ως 1kV και ως 999 GΩ (~1TΩ) για dc τάσεις από 1 ως 5kV. Η αδυναμία αυτή εντοπίστηκε στη μέτρηση της αντίστασης των υλικών B, Z και H (αυτός είναι και ο λόγος που σε ορισμένες περιπτώσεις δεν σχεδιάστηκαν οι γραφικές παραστάσεις αυτών των υλικών).

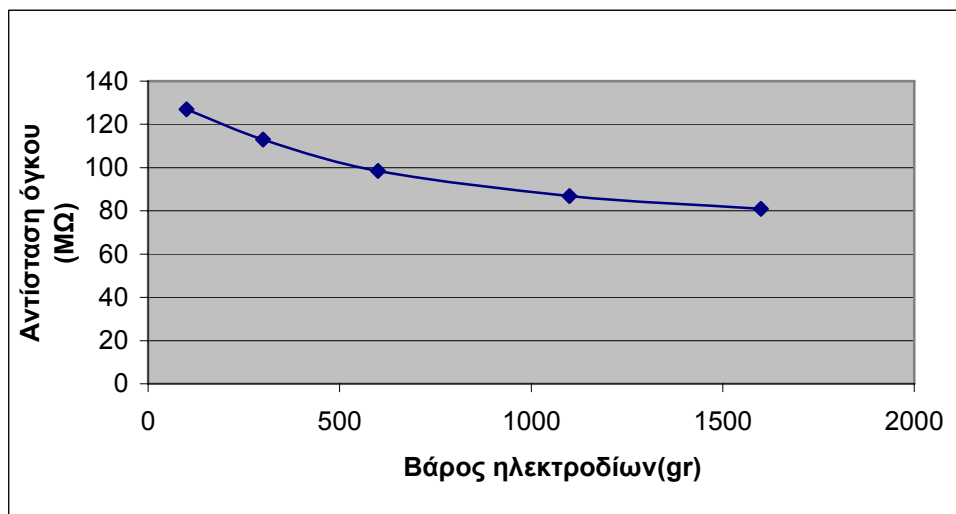
Από τους πίνακες 4.1-1 έως 4.1-14 παίρνουμε την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή της ειδικής αντίστασης όγκου βάση του προτύπου ASTM D257 για το κάθε υλικό (για όλα τα πάχη αυτού) και τις καταγράφουμε στον πίνακα 4.2.1. Παρατηρούμε ότι τα υλικά B,Z και H παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης όγκου.

Υλικό	$\rho_v$ {ASTM D257} ( $\Omega\text{cm}$ ) Min...Max
A	$16 \cdot 10^9 \dots 402 \cdot 10^9$
B	$4 \cdot 10^{12} \dots 1,8 \cdot 10^{14}$
Γ	$13 \cdot 10^9 \dots 59,51 \cdot 10^9$
Δ	$180 \cdot 10^9 \dots 289 \cdot 10^9$
E	$43 \cdot 10^9 \dots 129 \cdot 10^9$
Z	$733 \cdot 10^9 \dots 994 \cdot 10^9$
H	$612 \cdot 10^9 \dots 4,5 \cdot 10^{12}$

**Πίνακας 4.2-1 :** Μετρούμενες τιμές ειδικής αντίστασης όγκου όλων των δοκιμίων βάση του προτύπου ASTM D257

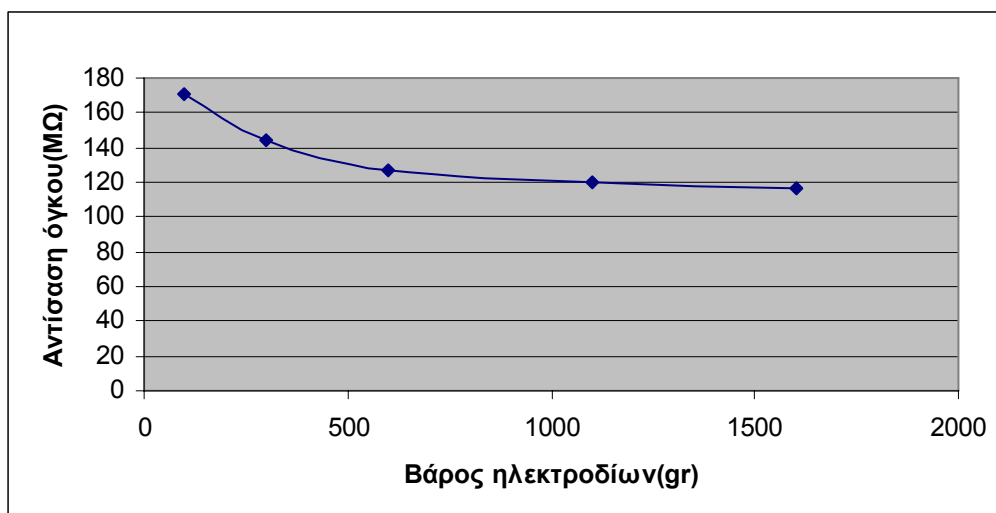
### **4.3 Μετρήσεις μεταβολής αντίστασης όγκου με μεταβολή του βάρους των ηλεκτροδίων**

Από τα στοιχεία του πίνακα 3.2-1 προκύπτει η γραφική παράσταση αντίστασης όγκου – βάρους ηλεκτροδίων σύμφωνα με το σχήμα 4.3.1, για το χρονικό διάστημα των 10s και για τάση 500V.



**Σχήμα 4.3-1 :** Μεταβολή αντίστασης όγκου του δοκιμίου 1 με τη μεταβολή του βάρους των ηλεκτροδίων

Από τα στοιχεία του πίνακα 3.2-2 προκύπτει η γραφική παράσταση αντίστασης όγκου – βάρους ηλεκτροδίων σύμφωνα με το σχήμα 4.3.2, για το χρονικό διάστημα των 10s και για τάση 500V.

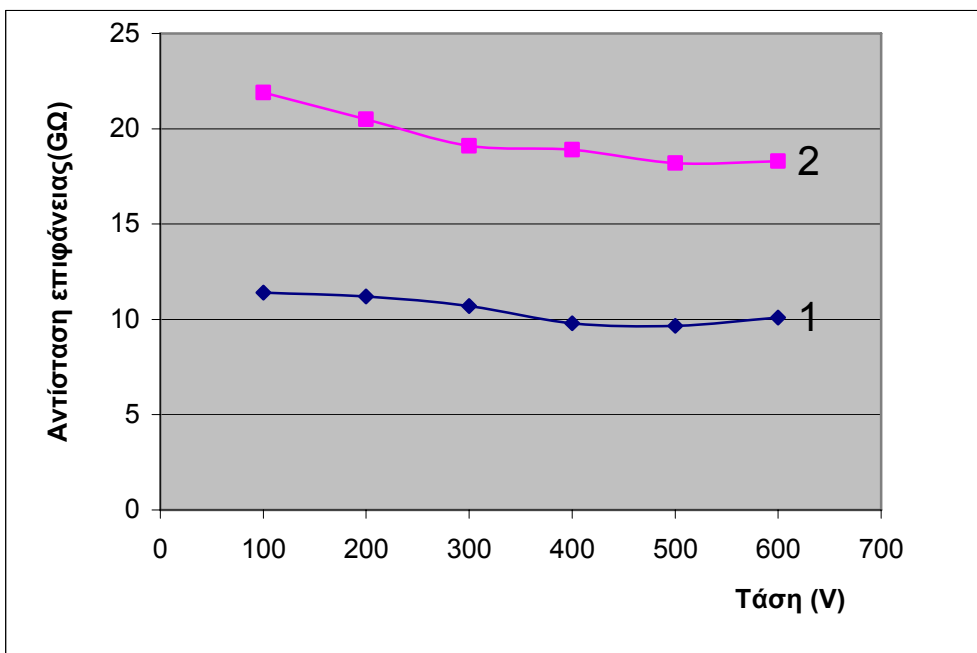


**Σχήμα 4.3-2 :** Μεταβολή αντίστασης όγκου του δοκιμίου 13 με τη μεταβολή του βάρους των ηλεκτροδίων

Παρατηρούμε τόσο στο δοκίμιο 1, όσο και στο δοκίμιο 13 μια εκθετική μείωση τις αντίστασης με την αύξηση του βάρους των ηλεκτροδίων που τοποθετούνται στην άνω πλευρά τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με μεγαλύτερο βάρος υπάρχει μεγαλύτερη πίεση από το άνω ηλεκτρόδιο στο υλικό και επιτυγχάνοντας καλύτερη προσκόλληση. Έτσι, αυξάνεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα της διάταξης και συνεπώς μειώνεται η αντίσταση του υλικού.

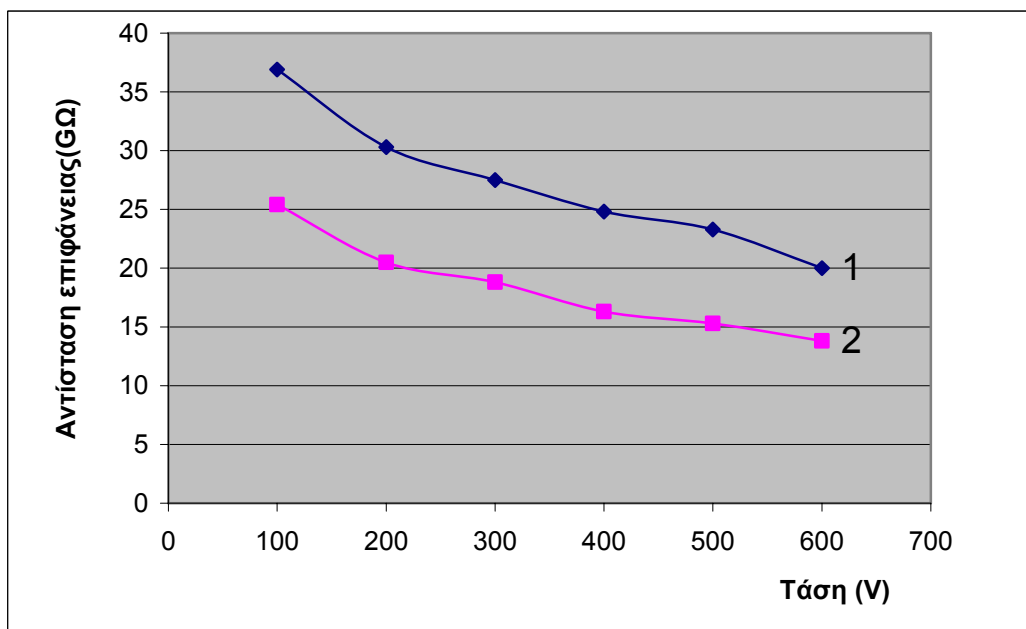
#### **4.4 Μετρήσεις ειδικής αντίστασης επιφάνειας**

Οι χαρακτηριστικές αντίστασης επιφάνειας – τάσης όπως προκύπτουν από τους πίνακες 3.3-1, 3.3-2, 3.3-5, 3.3-6, 3.3-7 και 3.3-8 (και για τους δύο τύπους ηλεκτροδίων Δ και Ε) δίνονται στους πίνακες 4.4-1 έως 4.4-6. Για τα υλικά Β, Η και Ζ (πίνακες 3.3-3, 3.3-4, 3.3-9, 3.3-10) δεν χαράσσονται οι χαρακτηριστικές καθώς οι τιμές αντίστασης επιφάνειας αυτών είναι πολύ ψηλές και το όργανο μέτρησης παρουσιάζει αδυναμία μέτρησης τους .



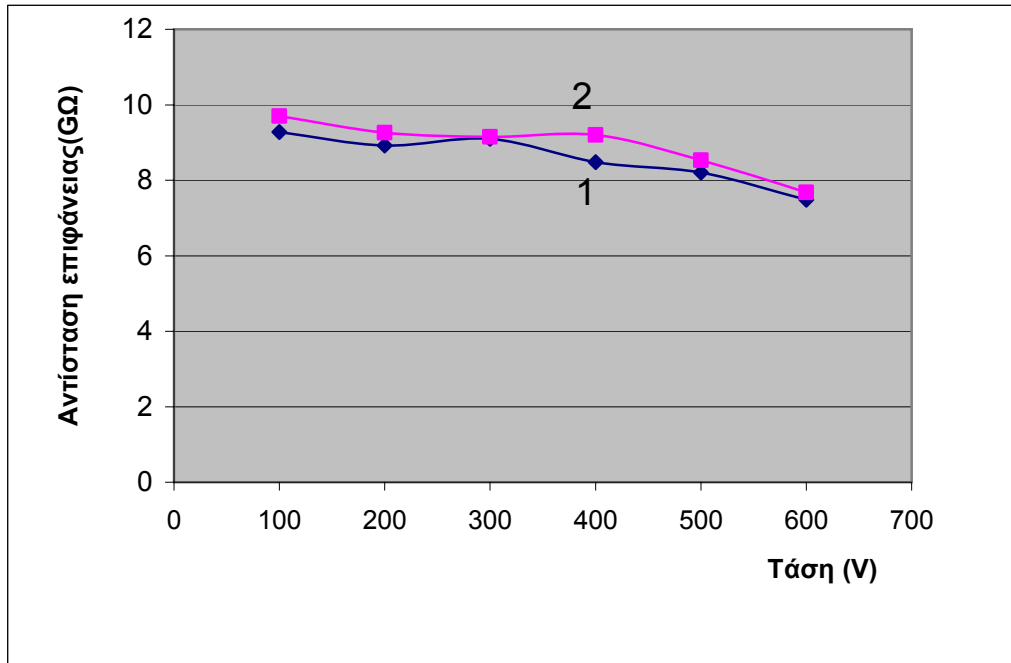
**Σχήμα 4.4-1 :** Μεταβολή αντίστασης επιφάνειας με τη μεταβολή της τάσης για το δοκίμιο 2

- 1 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Δ
- 2 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Ε



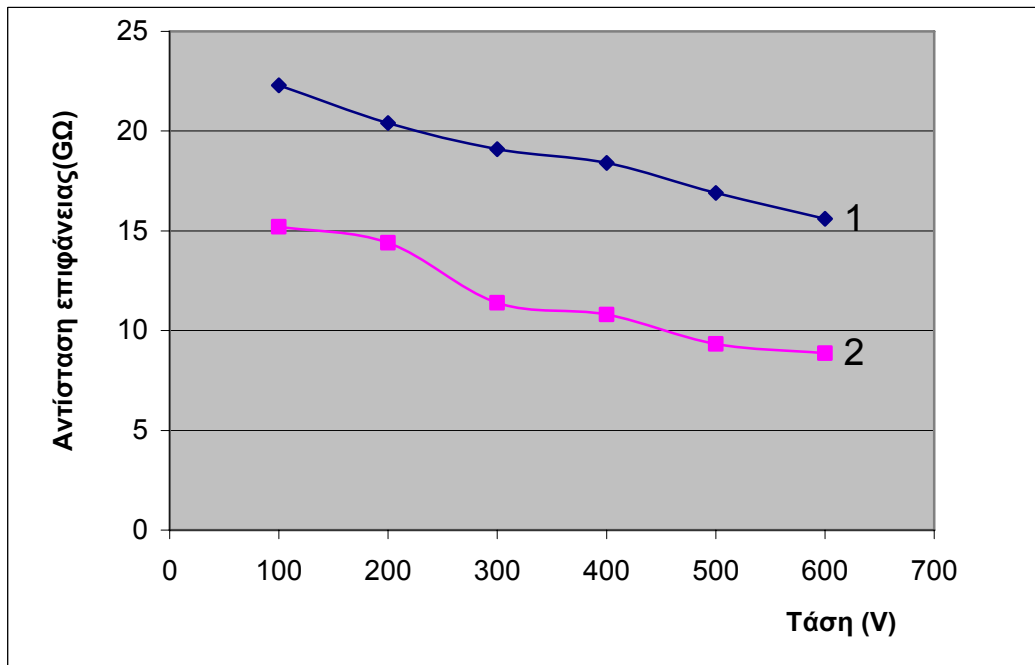
**Σχήμα 4.4-2 :** Μεταβολή αντίστασης επιφάνειας με τη μεταβολή της τάσης για το δοκίμιο 3

- 1 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Δ
- 2 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Ε



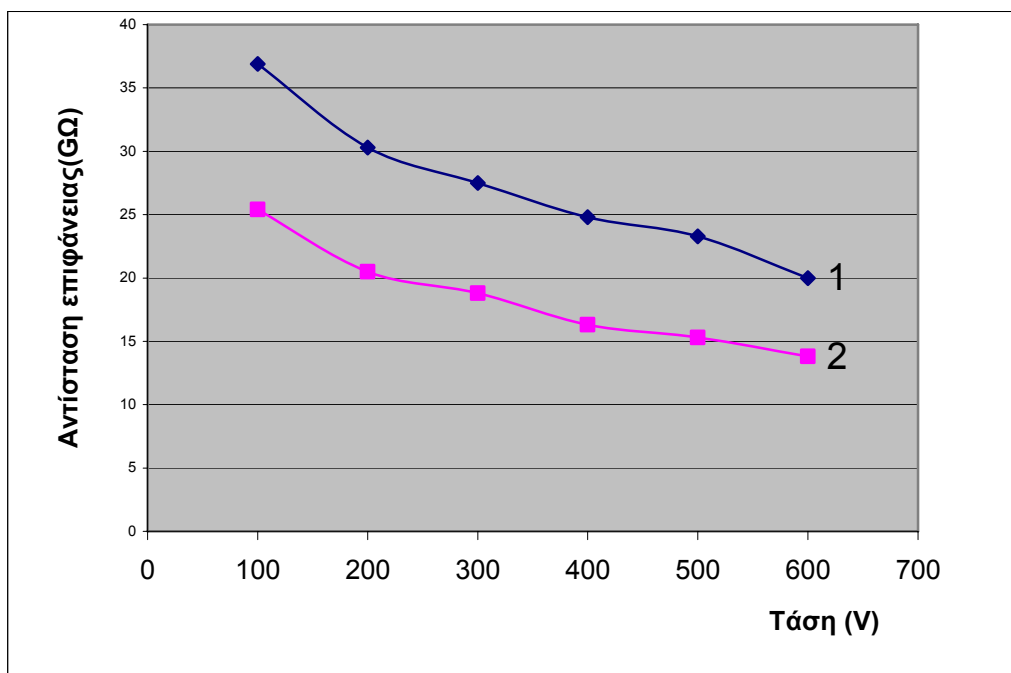
**Σχήμα 4.4-3 :** Μεταβολή αντίστασης επιφάνειας με τη μεταβολή της τάσης για το δοκίμιο 7

- 1 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Δ
- 2 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Ε



**Σχήμα 4.4-4 :** Μεταβολή αντίστασης επιφάνειας με τη μεταβολή της τάσης για το δοκίμιο 11

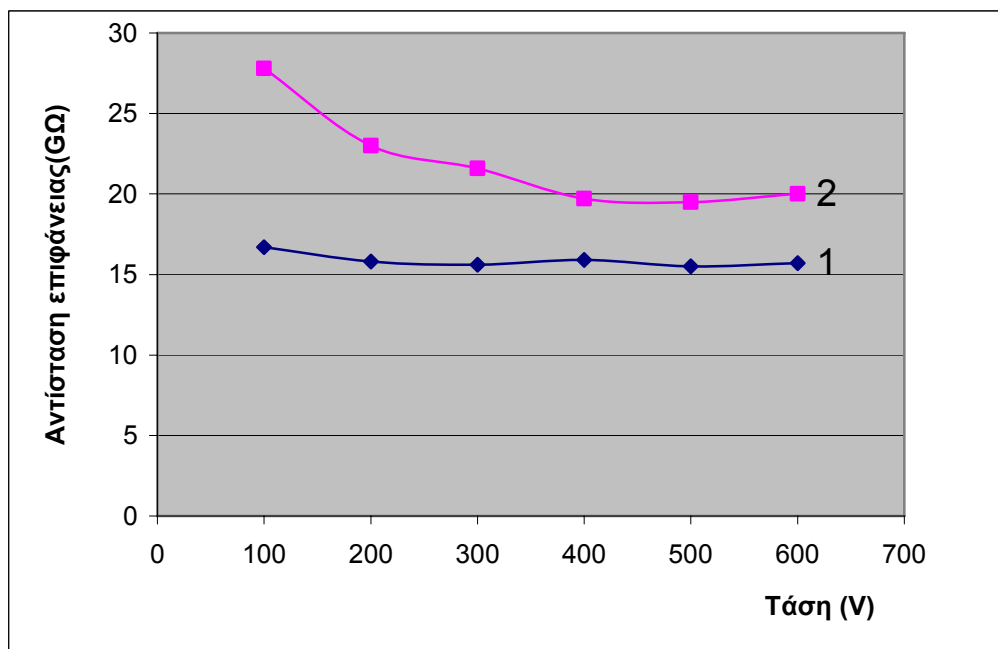
- 1 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Δ
- 2 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Ε



**Σχήμα 4.4-5 :** Μεταβολή αντίστασης επιφάνειας με τη μεταβολή της τάσης για το δοκίμιο 12

1 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Δ

2 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Ε



**Σχήμα 4.4-6 :** Μεταβολή αντίστασης επιφάνειας με τη μεταβολή της τάσης για το δοκίμιο 14

1 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Δ

2 : Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια τύπου Ε

Από τις χαρακτηρίστηκες των σχημάτων 4.4-1 έως 4.4-6 παρατηρούμε ότι η αντίσταση επιφάνειας (που σε αυτήν την περίπτωση ισούται με την ειδική αντίσταση επιφάνειας) μειώνεται εκθετικά καθώς αυξάνεται η συνεχής τάση. Τα υλικά Β,Ζ και Η παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές ειδικής αντίστασης επιφάνειας. Στις μετρήσεις αντίστασης επιφάνειας αυτών των υλικών παρατηρήθηκε το σφάλμα αδυναμίας του οργάνου να μετρήσει τις πολύ υψηλές τους αντιστάσεις. Επιπρόσθετα, αναφέρεται και το σφάλμα από τη μη τέλεια εφαρμογή του ηλεκτροδίου χαλκού στην επιφάνεια των δοκιμίων. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D257 τα ηλεκτρόδια αυτού του τύπου (φύλλα μετάλλου) μπορούν να ενωθούν με ένα κατάλληλο υλικό προσκόλλησης (π.χ. γράσο σιλικόνης) με το δοκίμιο υπό μια σταθερή πίεση. Έτσι όμως δημιουργείται ένα άλλο σφάλμα καθώς το υλικό προσκόλλησης προκαλεί αύξηση στην μετρηθείσα αντίσταση.

Στον πίνακα 4.4-1 καταγράφονται οι ελάχιστες και οι μέγιστες μετρούμενες τιμές ειδικής αντίστασης επιφάνειας, για το κάθε υλικό βάση του προτύπου ASTM D257. Παρατηρούμε ότι τα υλικά Β,Ζ και Η παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης επιφάνειας.

Υλικό	Μετρούμενη $p_v$ (500V,60sec) Min - Max τιμή ( $\Omega$ /sq)
A	$6,5 \cdot 10^9 - 21,9 \cdot 10^9$
B	$250 \cdot 10^9 - >250 \cdot 10^9$
Γ	$8,36 \cdot 10^9 - 9,43 \cdot 10^9$
Δ	$10,5 \cdot 10^9 - 19,6 \cdot 10^9$
E	$1,66 \cdot 10^{10} - 2,83 \cdot 10^{10}$
Z	$104 \cdot 10^9 - 114 \cdot 10^9$
H	$95,3 \cdot 10^9 - >250 \cdot 10^9$

**Πίνακας 4.4-1** : Μετρούμενες τιμές ειδικής αντίστασης επιφάνειας όγκου βάση του προτύπου ASTM D257





## Παράρτημα

### Όργανο Μέτρησης

METRISO 5000D-PI 5000 V Insulation Measuring Instrument, Digital



Το όργανο έχει δυνατότητα μέτρησης αντίστασης μόνωσης σε συσκευές και σε εξοπλισμό υπό τάση μέχρι 1000V. Έχει επίσης δυνατότητα μέτρησης αντίστασης μονώσεως για τιμές αντίστασης μονώσεως μέχρι 1 TΩ , και για τάσεις ανοιχτοκύκλωσης μέχρι 5000V.

Το όργανο αυτό είναι εξοπλισμένο με εύρος μέτρησης 1000V για συνεχή και εναλλασσόμενη τάση. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες ελέγχου συσκευών υπό δοκιμή για την απώλεια τάσης καθώς και τη δυνατότητα εκφόρτισης συσκευών που εμφανίζουν χωρητικότητα και που είναι υπό δοκιμή.

#### Δυνατότητες οργάνου

- Μέτρηση αντιστάσεων από 0,4 MΩ .. 1 TΩ
- Δοκιμές τάσεων σε διάφορες τιμές τάσης ή σε καθορισμένα βήματα των 100V, 250V, 500V, 1kV, 1.5kV, 2.0kV, 2.5kV, 5kV.
- Έλεγχος δείκτη πόλωσης και δείκτη απορρόφησης
- Μέτρηση τάσεων μέχρι 1000V
- Μέτρηση συχνότητας από 15Hz μέχρι 1kHz
- Μέτρηση χωρητικότητας από 0.1 μέχρι 5 μF
- Μέτρηση ηλεκτρικής εκφόρτισης
- -Δοκιμές Τάσεων ως 5000V

Το όργανο είναι ιδανικό για μη καταστροφικές (nondestructive) μετρήσεις αντιστάσεως μονώσεως σε ηλεκτρικά συστήματα , μηχανές, μετασχηματιστές, καλώδια και εξοπλισμό όπως αυτοκίνητα και σκάφη θαλάσσης, για επιλεγμένες τάσεις δοκιμών ως 5kV

#### Μέτρηση Τάσης ως 1000V

Ο έλεγχος για απώλεια τάσης στην συσκευή υπό δοκιμή σε συστήματα μέχρι 1kV μπορεί να πραγματοποιηθεί με το «voltage measuring range»( μέτρηση για διάφορα διαστήματα τάσεων)

#### Εκφόρτιση χωρητικών συσκευών υπό δοκιμή

Συσκευές που εμφανίζουν χωρητικότητα όπου μπορεί να έχουν φορτιστεί από τη δοκιμή τάσης, εκφορτίζονται από αυτό το όργανο μέτρησης. Η πτώση τάσης μπορεί να παρατηρηθεί στην οθόνη.

#### Μετρήσεις ρευμάτων

Το όργανο μπορεί να μετρήσει ονομαστικά ρεύματα ως 1mA σε τάσεις δοκιμών των 100 V, 250 V, 500 V η 1000 V.

#### Ενδειξη πόλωσης

Ο δείκτης πόλωσης ενδείκνυται για ηλεκτρικές μηχανές. Αυτή η διαδικασία εμπλέκει εκτενή έλεγχο της αντίστασης μονώσεως. Η συνεχής τάση εφαρμόζεται από το METRISO.5000 D-PI για διάστημα 10 λεπτών και αυτό καταγράφει την αντίσταση μόνωσης. Οι μετρηθείσες τιμές καταγράφονται μετά από ένα λεπτό και μετά από 10 λεπτά. Ο λόγος της μέτρησης στα 10 λεπτά προς τη μέτρηση στο 1 λεπτό είναι ο δείκτης πόλωσης.

Το MetrISO5000 Dpi έχει κατασκευαστεί και δοκιμαστεί σύμφωνα με τα παρακάτω πρότυπα και κανονισμούς:

#### **Πρότυπα**

DIN EN 61557-1:1998-05 , DIN EN 61557-2:1998-05,

IEC 1010-1:1990, IEC 1010-1/A2:1995, EN 61010-1:1993, EN 61010-1/A2:1995

#### **VDE κανονισμοί**

VDE 0413 Part 1:1998-05, VDE 0413 Part 2:1998-05,

VDE 0411 Part 1:1994-03

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- 1) S.O. Kasap , “Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών και Διατάξεων”, Αθήνα 2004, Παπασωτηρίου
- 2) Κ. Καγκαράκης, “Μαθήματα στα ηλεκτροτεχνικά υλικά – 1”, Αθήνα 1988.
- 3) Π.Δ. Μπούρκας “Βιομηχανικές Ηλεκτρικές Διατάξεις και Υλικά”, Αθήνα 2006.
- 4) Rolf E. Hummel “Understanding Materials Science”, Springer 1999.
- 5) Κωσταντίνος Θ. Δέρβος , Παναγιώτα Βασιλείου “Εισαγωγή στα Υλικά Μέρος Ι”, Ε.Μ.Π. 2003.
- 6) Κωσταντίνος Θ. Δέρβος , Παναγιώτα Βασιλείου “Εισαγωγή στα Υλικά Μέρος ΙΙ”, Ε.Μ.Π. 2003.
- 7) Osswald/Menges “Materials Science of Polymers for Engineers”, 1996.
- 8) Daniel D. Pollock “ Physical Properties of Materials for Engineers”, 2<sup>η</sup> Έκδοση, 1993.
- 9) ASTM D 257-99 “Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials”, ASTM International 2007.
- 10) Composite Materials : Properties, Nondestructive Testing and Repair Mel M. Schwartz, 1997.
- 11) Κ.Θ Δέρβος “Μονωτικά υλικά υψηλών τάσεων”, Αθήνα 2006.
- 12) K.J. Pascoe, “Properties of Materials for Electrical Engineers”, 1974.
- 13) James F. Shackelford, William Alexander “Materials Science and Engineering Handbook”, 3<sup>η</sup> Έκδοση, CRC Press 2001.