



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ &  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Δοκιμές Σκληρότητας σε Συνθετικούς Μονωτήρες  
Μέσης Τάσης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Μ. Ρουσόπουλος

**Καθηγητής :** Ιωάννης Φ. Γκόνος

**Επιβλέποντες :** Βασιλική Θ. Κονταργύρη

Χρήστος - Χριστόδουλος Αθ. Κοκάλης

Αθήνα, Ιούλιος 2021





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ &  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

## Δοκιμές Σκληρότητας σε Συνθετικούς Μονωτήρες Μέσης Τάσης

**Καθηγητής :** Ιωάννης Φ. Γκόνος  
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**Επιβλέποντες :** Βασιλική Θ. Κονταργύρη  
Ε.ΔΙ.Π Ε.Μ.Π.  
Χρήστος - Χριστόδουλος Αθ. Κοκάλης  
Υπ. Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30<sup>η</sup> Ιουλίου 2021

Αθήνα, Ιούλιος 2021

.....  
Ιωάννης Φ. Γκόνος

.....  
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής

.....  
Πάυλος Σ. Γεωργιλιάκης

.....

**Γεώργιος Μ.Ρουσόπουλος**

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Γεώργιος Μ.Ρουσόπουλος, 2021  
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 ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αφιερώνεται στον πατέρα μου

## **Περίληψη**

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μέτρηση της σκληρότητας Shore A σε τέσσερις συνθετικούς μονωτήρες μέσης τάσης. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε μέτρηση σκληρότητας στο ελαστομερές περίβλημα σιλικόνης, ενός αχρησιμοποίητου και τριών φυσικά γηρασμένων συνθετικών μονωτήρων στήριξης και ανάρτησης, τριών διαφορετικών κατασκευαστών, οι οποίοι ήταν εγκατεστημένοι στο Ελληνικό Δίκτυο Διανομής.

Οι μονωτήρες αφού κατηγοριοποιήθηκαν και έλαβαν κωδικές ονομασίες αφαιρέθηκαν τα κυάθια από το περίβλημα τους και υποβλήθηκαν σε μέτρηση σκληρότητας κατά το διεθνές πρότυπο ISO 48-4:2018 Shore A.

Ενώ το πρότυπο προδιαγράφει 5 μετρήσεις σκληρότητας σε κάθε κυάθιο μονωτήρα, πραγματοποιήθηκαν 125 μετρήσεις σκληρότητας Shore A σε διαφορετικά σημεία και υπο διαφορετικές γωνίες, ώστε να διερευνηθεί η μεταβλητότητα των εν λόγω μετρήσεων.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων των μετρήσεων με παράλληλη εξαγωγή συμπερασμάτων.

**Λέξεις κλειδιά:** Συνθετικοί μονωτήρες, σκληρότητα, ελαστομερή, ελαστομερές περίβλημα, silicone rubber, shore A

## **Abstract**

Subject of this diploma thesis is to examine the hardness of four composite medium voltage insulators. More specifically, were performed hardness measurements in the elastomeric silicone housing, of a new one and three naturally aged composite, post and suspension insulators, by three different manufacturers, which were installed in the Greek Distribution Network.

Specimens from the housing of each insulator were subjected to hardness measurement by Shore A method of the standard ISO 48-4: 2018 after each categorization and codification.

Although the standard requires 5 hardness measurements on the insulator's shed, we performed 125 hardness measurements in different angles and points in order to examine the variability of the measurements.

Finally, a comparative study of the results of the measurements is carried out while drawing conclusions.

**Key words:** Composite insulators, hardness, elastomers, insulating housing, silicone rubber, shore A





### **Ευχαριστίες**

Η παρούσα εργασία, εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του αναπληρωτή καθηγητή κου. Ιωάννη Φ. Γκόνου, τον οποίο και ευχαριστώ για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας αλλά και για τη βοήθεια που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της.

Ευχαριστώ επίσης την κα. Βασιλική Θ. Κονταργύρη (ΕΔΙΠ) και τον υποψήφιο διδάκτορα κο. Χρήστο – Χριστόδουλο Αθ. Κοκάλη, για τη συνεχή βοήθεια και την καθοδήγηση που μου παρείχαν σε όλο το διάστημα εκπόνησης της εργασίας, καθώς και για την έμπρακτη βοήθειά τους κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στους κυρίους Πολυχρόνη Βασίλη , υπεύθυνο Περιφερειακής Αποθήκης Χαλκίδας του ΔΕΔΔΗΕ και την κυρία Αργύρη Αναστασία, επιβλέπουσα μηχανικό της αναδόχου εταιρείας έργων ΔΕΔΔΗΕ για τις περιοχές Χαλκίδας και Αλιβερίου, ΑΚΤΩΡ ΑΤΕ, για την προμήθεια των μονωτήρων και τις πολύτιμες παρατηρήσεις τους οι οποίες συνέβαλαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της οικογένειάς μου για τη στήριξή τους.

## **Περιεχόμενα**

Περίληψη.....	2
Ευχαριστίες.....	5
Πρόλογος.....	8
<b>1 Εισαγωγή.....</b>	<b>9</b>
<b>1.1 Οι μονωτήρες στα Δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας.....</b>	<b>9</b>
1.1.1 Ιστορική εξέλιξη ανάπτυξης μονωτήρων.....	11
1.1.2 Τυπολόγιο Μονωτήρων.....	14
<b>1.2 Μονωτικά υλικά των μονωτήρων.....</b>	<b>18</b>
1.2.1 Κεραμικοί μονωτήρες.....	21
1.2.2 Συνθετικοί μονωτήρες.....	25
<b>2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....</b>	<b>32</b>
<b>2.1 Δοκιμές στους συνθετικούς μονωτήρες.....</b>	<b>32</b>
<b>2.2 Δομή προγράμματος Δοκιμών-Προτεινόμενες Δοκιμές.....</b>	<b>34</b>
2.2.1 Οπτική επιθεώρηση.....	34
2.2.2 Έλεγχος υλικών.....	35
<b>2.3 Η έννοια της σκληρότητας και μέθοδοι σκληρομέτρησης.....</b>	<b>39</b>
2.3.1 Η μέθοδος δυναμικής σκληρομέτρησης πολυμερών Shore.....	43
<b>2.4 Δοκιμές σκληρότητας σε συνθετικά υλικά.....</b>	<b>48</b>
<b>2.5 Μέτρηση σκληρότητας κατά το διεθνές πρότυπο ISO-48-4.....</b>	<b>52</b>
<b>3. Εργαστηριακές Δοκιμές.....</b>	<b>64</b>
<b>3.1 Μονωτήρες.....</b>	<b>64</b>
3.1.1 Προδιαγραφές Μονωτήρων ΔΕΔΔΗΕ (ΔΕΗ).....	64
3.1.2 Κωδικοποίηση.....	66
3.1.3 Γεωγραφικά Χαρακτηριστικά.....	67
<b>3.2 Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας.....</b>	<b>68</b>
3.2.1 Προετοιμασία των δοκιμών.....	68
3.2.2 Μέτρηση της σκληρότητας Shore A.....	71
<b>3.3 Πίνακες καταγραφής μετρήσεων και αποτελεσμάτων.....</b>	<b>73</b>
<b>3.4 Γραφικές παραστάσεις.....</b>	<b>85</b>
<b>4.Συμπεράσματα και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.....</b>	<b>91</b>
<b>Βιβλιογραφικές αναφορές.....</b>	<b>95</b>
<b>Πίνακας Εικόνων.....</b>	<b>101</b>

**Πίνακας Σχημάτων – Πινάκων ..... 103**

## Πρόλογος

Στην εργασία αυτή εξετάστηκαν τέσσερις συνθετικοί μονωτήρες, τρεις στήριξης και ένας ανάρτησης. Από το σύνολο των μονωτήρων οι τρεις ήταν σε λειτουργία στο δίκτυο μέσης τάσης (με διαφορετικό χρόνο λειτουργίας κάθε ένας) σε συνθήκες υπαίθρου, ενώ ένας δεν είχε εγκατασταθεί και λειτουργήσει.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται ιστορική αναδρομή σχετικά με την εξέλιξη των μονωτήρων, αναφέρονται οι κατηγορίες και τα είδη μονωτήρων που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα μέσης τάσης και περιγράφονται και εξηγούνται αναλυτικά τα βασικά χαρακτηριστικά και ο τρόπος κατασκευής των κεραμικών και των συνθετικών μονωτήρων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται τεχνικά θέματα γύρω από τους υπαίθριους συνθετικούς μονωτήρες, βάσει βιβλιογραφικών αναφορών. Γίνεται λόγος για τις δοκιμές που μπορούν να πραγματοποιηθούν στους συνθετικούς μονωτήρες σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα και οι προτεινόμενοι έλεγχοι και διαδικασίες που μπορούν να ακολουθηθούν ώστε να προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα για την κατάσταση και ποιότητα τους. Εν συνεχεία περιγράφεται η έννοια της σκληρότητας και οι αντίστοιχες δοκιμές στα ελαστομερή υλικά. Στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου, περιγράφεται αναλυτικά η μέθοδος μέτρησης της σκληρότητας Shore A κατά το πρότυπο ISO 48-4 που εφαρμόστηκε στο εργαστηριακό/ πειραματικό μέρος της παρούσας διπλωματικής.

Στο τρίτο κεφάλαιο, το οποίο αποτελεί και το εργαστηριακό/πειραματικό μέρος της εργασίας, καταγράφεται η διαδικασία προετοιμασίας των συνθετικών μονωτήρων, περιγράφονται οι εργαστηριακές δοκιμές οι οποίες διεξήχθησαν στο χώρο του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του Ε.Μ.Π. βάσει των οποίων προσδιορίζεται η σκληρότητα τους Shore A εφαρμόζοντας το διεθνές πρότυπο ISO 48-4: 2018 .

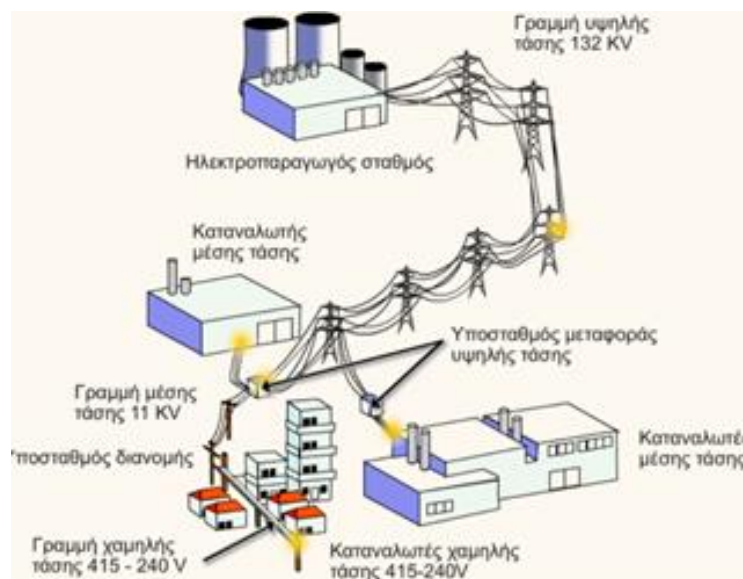
Τέλος στην ενότητα 4 πραγματοποιείται συγκριτική μελέτη των μετρήσεων με παράλληλη εξαγωγή συμπερασμάτων.

## 1 Εισαγωγή

### 1.1 Οι μονωτήρες στα Δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η ανάγκη εξασφάλισης της αξιοπιστίας των συστημάτων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ισχύος, όπως επίσης και των ποικίλων διατάξεων που συμμετέχουν στην λειτουργία των εν λόγω συστημάτων, σχετίζεται με το γεγονός ότι ο ρόλος των συστημάτων αυτών είναι καίριας σημασίας για την εύρυθμη λειτουργία και τη βέλτιστη δυνατή απόδοση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο βασίζεται στην μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής στους υποσταθμούς μεταφοράς οι οποίοι βρίσκονται έξω από μεγάλα αστικά ή αγροτικά κέντρα [1].

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται σε μονάδες που κατά κανόνα βρίσκονται μακριά από την κατανάλωση και τα μεγάλα αστικά κέντρα, με αποτέλεσμα να απαιτείται η χρήση συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος (electric power transmission), μέσω γραμμών μεταφοράς Υπερυψηλής Τάσης που μεταφέρουν σε υψηλά επίπεδα τάσης την παραγόμενη ενέργεια προς τους καταναλωτές, ελαχιστοποιώντας έτσι το κόστος των απωλειών [2].

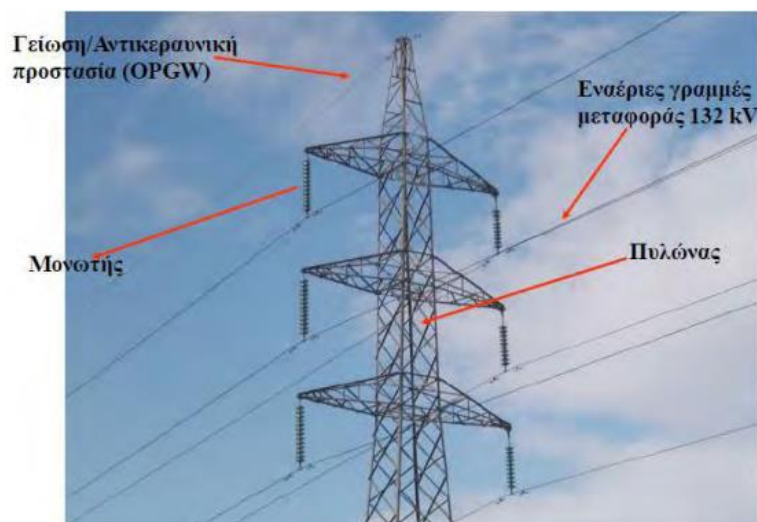


Εικόνα 1.1 Το σύστημα παραγωγής μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας [2]

Για να εξασφαλιστεί η απομόνωση των ηλεκτροφόρων στοιχείων από τα υπόλοιπα μέρη του εξοπλισμού και του περιβάλλοντος εγκαθίστανται διατάξεις από στερεά διηλεκτρικά υλικά, οι μονωτήρες. Γενικότερα, οι μονωτήρες χρησιμοποιούνται στα

συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας για να στηρίζουν, να αναρτούν, να διαχωρίζουν και να εμπεριέχουν τους αγωγούς που βρίσκονται υπό τάση [3].

Οι μονωτήρες αποτελούν διατάξεις που συμβάλλουν στην επιδιωκόμενη εξασφάλιση της αξιοπιστίας των συστημάτων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ισχύος. Αποτελούν δηλαδή πολύ σημαντικά μέρη των υποσταθμών και των γραμμών διανομής και μετάδοσης εντός του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [3]. Η κρίσιμη λειτουργία τους, έγκειται στο ότι εξασφαλίζουν την απομόνωση της διαρροής ηλεκτρικού ρεύματος από τους αγωγούς μεταφοράς στο έδαφος, μέσω των στύλων ή πυλώνων διανομής και μεταφοράς, στους οποίους τοποθετούνται, διαδραματίζοντας συνεπώς, πρωτεύοντα ρόλο στην αξιοπιστία του συστήματος μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ισχύος [4].



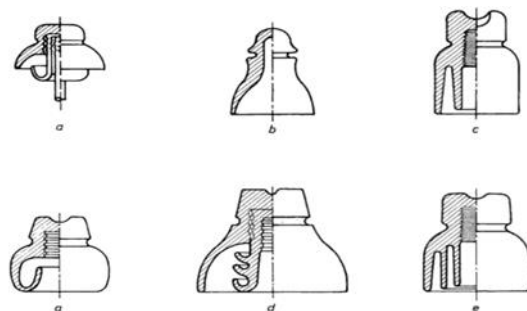
Εικόνα 1. 2 Εναέρια γραμμή μεταφοράς [5]

Η μονωτική ικανότητα μιας γραμμής μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ισχύος καθορίζεται σε γενικές γραμμές από ένα σύνολο παραμέτρων μεταξύ των οποίων οι ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των στοιχείων. Οι μονωτήρες αποτελούν τη δεύτερη συνιστώσα (μετά τον ατμοσφαιρικό αέρα) του μονωτικού συστήματος, η οποία πρέπει σε κάθε περίπτωση, δεδομένου ότι τα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι συνήθως εκτεθειμένα στα καιρικά φαινόμενα, να λειτουργεί αξιόπιστα, αφού η αστοχία ενός μονωτήρα αποτελεί ικανή συνθήκη για να τεθεί εκτός λειτουργίας ένα τμήμα δικτύου ή και ένα δίκτυο συνολικά [6]. Ειδικότερα καθορίζεται από τις

ελάχιστες αποστάσεις μέσα στον αέρα, τις ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ στοιχείων υπό τα δυναμικά της γης και των φάσεων, καθώς και τις ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των φάσεων με τη μεσολάβηση του περιβάλλοντος αέρα. Η εξασφάλιση των ελάχιστων αυτών αποστάσεων, πραγματοποιείται μέσω της τοποθέτησης των κατάλληλων μονωτήρων στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής δηλαδή μέσω της ανάρτησης ή στήριξης των αγωγών των φάσεων με μονωτήρες [7].

### 1.1.1 Ιστορική εξέλιξη ανάπτυξης μονωτήρων

Το 1882, υπήρξε το έτος ορόσημο για την αρχή της μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, όταν ο Thomas Edison εγκατέστησε μια μηχανή ατμού και μια γεννήτρια ατμού 1200 ίππων σε μια αποθήκη στη Νέα Υόρκη και άρχισε να παρέχει ισχύ στα 1300 βολτ DC μέσω ενός δικτύου τηλεγραφικής γραμμής 37 μιλίων, σε έναν αριθμό συνδρομητών που χρησιμοποίησε αυτό τον πρώτο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για σκοπούς ηλεκτροφωτισμού. Οι τηλεγραφικοί μονωτήρες (Εικόνα 1.3) χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά το 1835.



Εικόνα 1.3 Μονωτήρες που χρησιμοποιούνταν σε δίκτυα τηλεγράφων και στη μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας. [3]

Η πρώτη οργανωμένη προσπάθεια ανάπτυξης δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιήθηκε αρκετά αργότερα το έτος 1882. Η πρώτη χαρακτηριστική προσπάθεια υλοποίησης γραμμής μεταφοράς ήταν αυτή στο Miesbach του Μονάχου. Επρόκειτο για ένα σχέδιο των Miller και Duprez, με στόχο την επίδειξη λειτουργίας ενός τεχνητού καταρράκτη στην Έκθεση Ηλεκτρισμού Μονάχου (Munich Electrical Exhibition) [8].

Ειδικότερα επρόκειτο για μετάδοση ισχύος συνεχούς ρεύματος 1400 Volt από το Miesbach στο Μόναχο σε μια απόσταση 57 km. Το πείραμα αυτό των Marcel Deprez και Oskar von Miller το 1882 και η τριφασική μετάδοση ρεύματος 15000 Volt από το

Lauffen στη Φρανκφούρτη (175 km) το 1891 – υπήρξαν δύο περιπτώσεις μεγάλης κλίμακας που απέδειξαν ότι η ηλεκτρική ενέργεια υψηλής τάσης θα μπορούσε να μεταδοθεί σε μεγάλες αποστάσεις και να διανεμηθεί από καλά τοποθετημένους σταθμούς παραγωγής ενέργειας με λογικό κόστος. Όλο και περισσότερο, η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιήθηκε ως πηγή κινητήριας δύναμης καθώς και για σκοπούς φωτισμού, ιδιαίτερα μετά την εφεύρεση του επαγωγικού κινητήρα μεγάλης ισχύος το έτος 1889[8].

Μια επίσης σημαντική εξέλιξη, η οποία ακολούθησε ήταν αυτή του Charles Eugene Lancelot Brown στην εταιρεία Brown Boveri Company στην Ελβετία, Για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση γραμμών μεταφοράς, ο Charles Eugene Lancelot Brown χρησιμοποίησε μονωτήρες με εμποτισμό λαδιού. Η κατασκευή τους βασίστηκε στα σχέδια μονωτήρων τηλεγραφίας των Johnson και Philips [9].

Στη συνέχεια η ανάπτυξη των μονωτήρων μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος υπήρξε ραγδαία. Σήμερα εδώ και πενήντα περίπου χρόνια, η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας υλοποιείται μέσω γραμμών υψηλής τάσης και απόστασης πολλών χιλιομέτρων, τόσο στις ΗΠΑ, όσο και στην Σοβιετική Ένωση αλλά και στα δίκτυα της Ευρώπης.

Με το πέρασμα του χρόνου, οι νέες απαιτήσεις και ανάγκες στην μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος ανέδειξαν σημαντικά ελλείμματα αφενός στα υλικά των μονωτήρων αλλά και στα σχέδιά τους, τα οποία όπως προαναφέρθηκε στο αρχικό στάδιο αποτελούσαν απλώς αντίγραφα των μονωτήρων για τους τηλεγράφους. Μερικά από τα προβλήματα που έπρεπε να αντιμετωπιστούν ήταν η διάτρηση των κεραμικών μονωτήρων από την ηλεκτρική τάση, κυρίως όσων ήταν ελαττωματικοί ή είχαν εκτεταμένους πόρους στην επιφάνεια, ή ρωγμές που προκαλούνταν από τη θερμική διαστολή ή διαβρώσεις στους μονωτήρες που δημιουργούνταν από τους επιφανειακούς ρύπους σε συνδυασμό με την υγρασία. Οι προκλήσεις αυτές, επέβαλλαν την αναγκαιότητα εξέλιξης των μονωτήρων τόσο σε σχεδιαστικό όσο και σε επίπεδο κατασκευαστικών κανόνων [10].

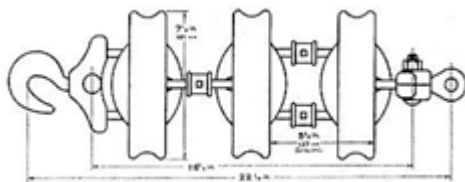
Έκτοτε στις αρχές του 20ου αιώνα όταν πλέον υπήρξε μετάβαση στο καθεστώς της μαζικής παραγωγής και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, και της εξέλιξης των δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, σε διαρκώς μαζικότερο επίπεδο κατανάλωσης, η εξέλιξη αυτή είχε ως αποτέλεσμα την ανάγκη δημιουργίας ενός



στοιχείου το οποίο θα μπορούσε να εξασφαλίσει την απομόνωση των γραμμών μεταφοράς από το έδαφος. Ενώ όμως ήταν διαθέσιμη μια ποικιλία υλικών τα οποία θα μπορούσαν να παρέχουν μόνωση μεταξύ αγωγών και εδάφους, σε συνθήκες ξηρότητας, σύντομα διαπιστώθηκε ότι το εγχείρημα αυτό ήταν δύσκολα υλοποιήσιμο σε περιβάλλοντα αυξημένης υγρασίας και ρύπανσης του αέρα [11].

Κάποια σχέδια μονωτήρων των αρχών του 19ου αιώνα αποτελούσαν απλώς εξελιγμένα μοντέλα των μονωτήρων που χρησιμοποιούνταν στις τηλεγραφικές γραμμές. Ωστόσο καθώς οι αρχικοί μονωτήρες στήριξης είχαν αρκετά μεγάλο μέγεθος και βάρος, αυτό αποτέλεσε πρόβλημα τόσο στην κατασκευή όσο και στην εγκατάσταση και λειτουργία τους. Οι μονωτήρες στήριξης που κατασκευάζονταν στις ΗΠΑ, αποτελούνταν από λεπτό περίβλημα πορσελάνης και γυαλί το οποίο είχε υποστεί συγκεκριμένη κατεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες [9].

Σε αντίθεση με την αμερικανική τεχνολογία, η ευρωπαϊκή τεχνολογία μονωτήρων από πορσελάνη προηγούνταν της τεχνολογίας που είχε αναπτυχθεί στις ΗΠΑ. Αυτό γιατί επρόκειτο για μια τεχνολογία η οποία διευκόλυνε την κατασκευή μεγάλων μονωτήρων ανάρτησης, οι οποίοι αποτελούνταν από κάποια τμήματα πορσελάνης, χωρίς την ύπαρξη πολλαπλών εσωτερικών μεταλλικών στοιχείων. Στους εν λόγω μονωτήρες το κεραμικό υλικό ή το γυαλί συμπίεζονταν με μηχανικό τρόπο [12]. Το 1907 κατασκευάστηκε ένας δισκοειδής μονωτήρας ο οποίος ονομάστηκε «Helwett».



Εικόνα 1.4 Μονωτήρας τύπου «Helwett» [12]

Βασικό χαρακτηριστικό του μονωτήρα Helwett, ήταν ότι διέθετε μεγάλο μήκος ερπυσμού<sup>1</sup> μεταξύ των ηλεκτροδίων, ασφαλή συμπεριφορά σε περίπτωση θραύσης από μηχανική κρούση κατά τη διάρκεια λειτουργίας του όπως επίσης και μη ύπαρξη συνδετικού τσιμέντου εσωτερικά. Ωστόσο υπήρχε σημαντική δυσκολία σε κατασκευαστικό επίπεδο. Ο μονωτήρας τύπου «Helwett» παρόλο που δεν μπορεί να στηρίζει μεγάλα φορτία, χρησιμοποιήθηκε ωστόσο εντατικά για μεγάλο χρονικό

διάστημα, και μάλιστα χρησιμοποιείται και σήμερα σε περιπτώσεις όπου σύγχρονοι μονωτήρες ανάρτησης εμφανίζουν διάβρωση [12].

Η εξέλιξη στην ανάπτυξη των μονωτήρων τις πρόσφατες δεκαετίες, δεν εμφανίζει σημαντική εξέλιξη ως προς την τεχνολογία τους, αλλά συνεχείς αυξήσεις στο μέγεθός τους κατά κύριο λόγο, μια εξέλιξη που υπαγορεύεται από τις απαιτήσεις μεταφοράς, προκειμένου να αντιμετωπιστούν με επιτυχία οι ανάγκες συνεχούς ρεύματος και υψηλών τάσεων. Έτσι, οι όποιες αλλαγές αφορούν κατά κύριο λόγο το σχεδιαστικό μέρος, ενώ παράλληλα χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό και ανάπτυξή τους κεραμικά υλικά, όπως το σκληρυμένο γυαλί, υλικά που καλούνται να βελτιώσουν τη μηχανική κυρίως αντοχή των μονωτήρων [9]<sup>1</sup>.

### 1.1.2 Τυπολόγιο Μονωτήρων

Πέραν των βασικών χαρακτηριστικών των μονωτήρων και της βασικής λειτουργίας τους δηλαδή την συμβολή τους στην απομόνωση των ηλεκτροφόρων στοιχείων μιας εγκατάστασης από τα μη ηλεκτροφόρα, οι μονωτήρες διακρίνονται σε επιμέρους κατηγορίες με βάση ορισμένα κριτήρια μεταξύ των οποίων είναι (α) το υλικό κατασκευής (β) ο τρόπος σύνδεσης (γ) το σχήμα τους και (γ) τον χώρο τοποθέτησης και χρήσης τους. Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν οι βασικές κατηγοριοποιήσεις των μονωτήρων με βάση τα εν λόγω κριτήρια.

**Μονωτήρες διέλευσης (bushings):** Οι μονωτήρες διέλευσης χρησιμοποιούνται για τη μόνωση των αγωγών των ακροδεκτών υψηλής τάσης. Το υλικό κατασκευής τους είναι συνήθως πορσελάνη. Ο τύπος αυτός μονωτήρων επιλέγεται στην περίπτωση που είναι αναγκαία η διέλευση της γραμμής από το μονωτήρα και η ταυτόχρονη στήριξή της σε αυτόν [12]. Ο μονωτήρας διέλευσης επιτρέπει σε έναν ηλεκτροφόρο αγωγό να περάσει ασφαλώς μέσω κελύφους διαφορετικού δυναμικού, εσωκλείοντάς τον (π.χ. ακροδέκτες μετασχηματιστών ή διακοπών ισχύος). Ο σχεδιασμός τους πρέπει να διασφαλίζει κυρίως αντοχή σε ηλεκτρικά φαινόμενα μεταβατικής κατάστασης αλλά και μηχανική αντοχή στη διάτρηση[3].

---

<sup>1</sup> Το μήκος ερπυσμού (leakage distance) ορίζεται ως η συντομότερη διαδρομή επί της επιφάνειας του μονωτήρα ανάμεσα στα δύο μεταλλικά άκρα του (μήκος της εξωτερικής ημιπεριμέτρου του μονωτικού υλικού σε επίπεδο τομής διερχόμενο από τον άξονα συμμετρίας του μονωτήρα)[6].

**Μονωτήρες στήριξης:** Χρησιμοποιούνται για τη στήριξη των αγωγών μέσης και υψηλής τάσης και εγκαθίστανται κάθετα ή οριζόντια συνήθως πάνω σε βραχίονες στήριξης.

- **Τύπου pin:** Αρχικά οι εν λόγω μονωτήρες χρησιμοποιήθηκαν εκτενώς στις τηλεφωνικές γραμμές και στα αλεξικέραυνα. Ωστόσο στη συνέχεια μετά από συνεχείς τροποποιήσεις χρησιμοποιήθηκαν και στα δίκτυα υψηλής τάσης μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας έως 33kV. Ανάλογα με το σχέδιό του λέγεται και μονωτήρας τύπου κώδωνος [69]. Έχει αυλακώσεις στο επάνω μέρος για τη στήριξη του ρευματοφόρου αγωγού στην κεραμική κορυφή του (πορσελάνινη ή γυάλινη) και τη συγκράτηση του σύρματος πρόσδεσης του αγωγού στην πλευρική αυλάκωση (βλ. Εικόνα 1.3). Ένα στρώμα τσιμέντου ενώνει το σώμα του μονωτήρα με τον πείρο στήριξης [6].



Εικόνα 1.5 Μονωτήρας τύπου Pin ( Pin insulators) [13]

- **Τύπου post:** είναι παρόμοιοι με τους μονωτήρες τύπου pin, όμως έχουν είτε μεταλλικό ακροδέκτη στην κεφαλή είτε συνθετικό, περισσότερες πτυχώσεις και ύψος, δηλαδή μεγαλύτερο μήκος ερπυσμού άρα είναι πιο κατάλληλοι για εφαρμογές υψηλότερης τάσης. Οι ακροδέκτες σε κάποια είδη μονωτήρων ανάρτησης τύπου post διαθέτουν σφινγκτήρα αρπάγης για τη συγκράτηση του ηλεκτροφόρου αγωγού, ενώ υπάρχουν μονωτήρες με δυνατότητα προέκτασης για μεγαλύτερα μήκη ερπυσμού. Στα δίκτυα Η.Ε. τοποθετείται (συνήθως) κάθετα αλλά και οριζόντια, ενώ κατασκευάζεται από κεραμικά και συνθετικά μονωτικά υλικά [1].
- **Μονωτήρες στήριξης γραμμής (line post):** Πρόκειται για μια βασική εφαρμογή στην στήριξη των αγωγών από υψηλές τάσεις. Διακρίνονται σε μονωτήρες γραμμής μεταφοράς και μονωτήρες υποσταθμών και σε μονωτήρες από ελαστομερές υλικό ή πορσελάνης ανάλογα με το υλικό κατασκευής. Το

ελαστομερές της σιλικόνης (Silicone Rubber, SIR) αποτελεί σήμερα την βέλτιστη επιλογή για την μόνωση υπαίθριων εγκαταστάσεων Υψηλής Τάσης, όπως Υποσταθμοί και Γραμμές Μεταφοράς. Σημαντικό πλεονέκτημα του, αποτελεί η σαφώς αναβαθμισμένη συμπεριφορά που επιδεικνύει σε συνθήκες ρύπανσης. Αυτή οφείλεται στις ιδιότητες της επιφάνειας του υλικού και ιδιαίτερα στην ικανότητα του να διατηρεί υδρόφοβα χαρακτηριστικά, ακόμη και μετά την επικάλυψη στην επιφάνεια υδρόφιλων ρύπων. Η ικανότητα αυτή, γνωστή και ως ευστάθεια της επιφανειακής υδροφοβίας (Hydrophobicity Stability), αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, όπου παρατηρούνται κύκλοι απώλειας και ανάκαμψης της υδροφοβίας στενά συνδεδεμένοι με τις συνθήκες καταπόνησης αλλά και τον βαθμό γήρανσης. Το SIR διατίθεται στην αγορά σε τρεις διαφορετικές μορφές, όλες βασισμένες στο ίδιο βασικό πολυμερές, την πολυδιμεθύλσιλοξάνη (Polydimethylsiloxane, PDMS). Ο παράγοντας διαφοροποίησης είναι η διαδικασία βουλκανισμού, δηλαδή του μηχανισμού ανάπτυξης δεσμών μεταξύ των μακρομορίων [14]. Οι μονωτήρες πορσελάνης αποτελούνται από έναν συμπαγή κύλινδρο πορσελάνης, με κυματοειδείς πτυχές. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η αύξηση του μήκους ερπυσμού. Σε κάθε άκρη τους διαθέτουν μεταλλικά ηλεκτρόδια [12]. Οι μονωτήρες γραμμής όταν χρησιμοποιούνται για τη στήριξη αγωγών σε δίκτυα διανομής έχουν ονομαστική τάση έως και 35 kV ενώ στα δίκτυα μεταφοράς συνήθως πάνω από 69 kV. [8] Οι μονωτήρες στήριξης γραμμής εγκαθίστανται κάθετα ή οριζόντια. Οι συνθετικοί μονωτήρες γραμμής των δικτύων μεταφοράς, δεδομένου ότι πρέπει να φέρουν σημαντικά μεγαλύτερα φορτία από ότι οι μονωτήρες στήριξης που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα διανομής, έχουν πυρήνα από FRP συνήθως διαμέτρου 63 mm 76 mm και (πιο σπάνια) 88 mm [6].

- **Μονωτήρες ανάρτησης:** χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανάρτηση των γραμμών μεταφοράς και διανομής και αποτελούνται από μία (ή δύο σε γραμμές μεταφοράς) σειρά δισκοειδών μονωτήρων, διατεταγμένων σε μορφή αλύσου. Το πλήθος των δισκοειδών μονωτήρων σε μια διάταξη αλύσου, εξαρτάται από την τάση λειτουργίας της γραμμής και από τη διηλεκτρική αντοχή έκαστου δισκοειδούς μονωτήρα [6].
- **Τύπου cap & pin:** Οι μονωτήρες τύπου Cap and Pin, κατασκευάζονται από πορσελάνη ή γυαλί ή συνθετικό υλικό με ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά το

σιλικονούχο καουτσούκ (silicon rubber) και το EDPM. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των σύνθετων πολυμερών μονωτήρων είναι η μείωση βάρους μέχρι και 90% σε σχέση με τους αντίστοιχους κεραμικούς ενώ όσον αφορά την κατασκευή τους βασίζεται στις ίδιες αρχές με τους μονωτήρες τύπου pin. Σε πρακτικό επίπεδο αυτός ο τύπος μονωτήρων αποτελεί ένα σύνολο μονάδων pin, που συνδέονται μεταξύ τους. Ειδικότερα ένας αριθμός τέτοιων μονάδων συνδέονται μεταξύ τους, μέσω χαλύβδινων καλυμμάτων (caps) και πείρων (pins) ώστε να σχηματίσουν μια διάταξη μονωτήρων. Οι διατάξεις αυτές χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο ως μονωτήρες ανάρτησης και στήριξης γραμμών μεταφοράς. Για την στερέωση των καλυμμάτων και των πείρων στο γυάλινο ή πορσελάνινο δίσκο, χρησιμοποιείται κυρίως τσιμέντο [15]. Η διάταξη αλυσίδας πλεονεκτεί στη συντήρηση αφού ένα φθαρμένο τμήμα αντικαθίσταται εύκολα με νέο.



Εικόνα 1.6 Μονωτήρας τύπου cap and pin [16]

- **Μονωτήρες στήριξης σταθμού (station post):** οι μονωτήρες αυτοί χρησιμοποιούνται σε υποσταθμούς για τη στήριξη εξοπλισμού (διακοπτικών στοιχείων, κτλ) και η ονομαστική τους τάση κυμαίνεται από 40kV έως 550kV. Διαφέρουν από τους line post ως προς τους ακροδέκτες και την ονομαστική μηχανική αντοχή [6]

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου μονωτήρα και η διαστασιολόγησή του γίνεται βάσει του τεχνικού προτύπου IEC 60815 [17] το οποίο κατηγοριοποιεί τα επίπεδα ρύπανσης του περιβάλλοντος εγκατάστασης και προτείνει αντίστοιχα μήκη ερπυσμού.

- **Τύπου μεγάλου μήκους (long rod):** Μια παραλλαγή μονωτήρων στήριξης είναι οι μονωτήρες μεγάλου μήκους ή επιμήκεις μονωτήρες (longrod). Πρόκειται για ένα είδος μονωτήρων μικρότερου βάρους και πάχους. Χρησιμοποιούνται κατά

κύριο λόγω ως μονωτήρες αναρτήσεως, ενώ σε σχέση με τους μονωτήρες cap and pin έχουν το πλεονέκτημα ότι τα μεταλλικά εξαρτήματα, βρίσκονται στα άκρα τους και είναι λιγότερα [19]. Οι πρώτοι μονωτήρες τύπου μεγάλου μήκους από πορσελάνη κατασκευάστηκαν στη Γερμανία τη δεκαετία του 1920 ως εναλλακτική λύση για τους μονωτήρες τύπου cap & pin.



Εικόνα 1.7 Πορσελάνινος μονωτήρας ανάρτησης τύπου μεγάλου μήκους [20]

Χρησιμοποιήθηκαν επίσης σε εφαρμογές μεταφοράς ισχύος σε περιβάλλον με ρύπανση. Οι μονωτήρες τύπου μεγάλου μήκους με συνθετικό υλικό έχουν πλέον την δυνατότητα κατασκευής σε μήκη έως και 20 μέτρα, κάτι που δεν είναι δυνατό με τα συμβατικά κεραμικά μονωτικά υλικά όπως η πορσελάνη και το γυαλί [6]

## 1.2 Μονωτικά υλικά των μονωτήρων

Στις αρχές του 20ού αιώνα, τα υλικά που χρησιμοποιούνταν για την κατασκευή των ηλεκτρικών μονωτήρων ήταν κυρίως φυσικές ουσίες, όπως mica, καουτσούκ, μάρμαρο και πίσσα. Αυτά τα υλικά τα οποία θεωρούνται ως η πρώτη γενιά μονωτικών υλικών, παράγονταν από φυτά ή από ορυκτά ή άλλα ανόργανα, ωστόσο είχαν κακές ηλεκτρικές ιδιότητες. Η χαμηλή αντίσταση και η αντοχή τους στη διάσπαση περιόριζαν σημαντικά τις δυνατότητες μόνωσης και τα επίπεδα ισχύος των ηλεκτρικών εξοπλισμού καθώς και τη χρήση διηλεκτρικών σε εξειδικευμένα ηλεκτρικά όργανα [20].

Στη δεκαετία του 1950, με την παγκόσμια οικονομική ανάπτυξη, παρατηρήθηκε μια σταθερά αυξανόμενη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια [20] που οδήγησε σε ταχεία επέκταση στους τομείς του ηλεκτρικού εξοπλισμού και των μονωτικών υλικών. Με την ανάπτυξη των πολυμερών, η αγορά των μονωτήρων εμπλουτίστηκε με συνθετικά υλικά όπως ρητίνες, μονωτικά βερνίκια, εμποτισμένες μονωτικές ίνες και σύνθετα υλικά [21].

Καθώς αυτά τα υλικά είχαν καλύτερες ηλεκτρικές ιδιότητες από τα μονωτικά υλικά πρώτης γενιάς και ήταν εύκολο να παραχθούν, χρησιμοποιήθηκαν ευρέως σε όλα τα είδη των μονωτήρων, ακόμη και σε ακραίες συνθήκες. Ως εκ τούτου, τα πολυμερή υλικά έγιναν η δεύτερη γενιά μονωτικών υλικών. Το βασικό πλεονέκτημα των πολυμερών ήταν ότι οι ιδιότητές τους θα μπορούσαν να προσαρμοστούν αλλάζοντας τη χημική τους σύνθεση και τη μοριακή δομή τους [19].

Καθώς σημειώθηκε πρόοδος στον χαρακτηρισμό αυτών των ιδιοτήτων, στο σχεδιασμό των μοριακών δομών τους και στη μελέτη των εξειδικευμένων ιδιοτήτων των πολυμερών, η έρευνα για μονωτικά πολυμερή υλικά ήταν ιδιαίτερα επιτυχής. Οι κατασκευαστές θα μπορούσαν να παράγουν μονωτήρες διάφορων κατηγοριών, οι οποίοι θα πληρούσαν υψηλά πρότυπα ποιότητας και μέσω της προσαρμογής των υλικών τους θα μπορούσαν να πληρούν παράλληλα, ένα ευρύ φάσμα προδιαγραφών [22].

Ωστόσο, καθώς το επίπεδο των συστημάτων ισχύος συνέχισε να αυξάνεται και παράλληλα και οι δοκιμές των πολυμερών, τα πολυμερή υλικά αντιμετώπισαν προβλήματα στην μικροδομή τους από την επίδραση της πολικότητας προερχόμενη από τις φορτίσεις της ατμόσφαιρας. Οι φορτίσεις αυτές οδηγούν σε μειωμένη πυκνότητα υλικού και τέλος σε αστοχίες [21]. Επιπλέον, η άνοδος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως η ηλιακή και η αιολική, οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις των οποίων είναι εκτεθειμένες στα καιρικά φαινόμενα και σε διαφορετικές συνθήκες, (UV ακτινοβολία, υγρασία, όξινη βροχή, παγετός, αέρας) επηρεάζουν τα πολυμερή υλικά που χρησιμοποιούνται με αποτέλεσμα να εξερευνηθούν ιδιότητες υλικών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε αυτά περιβάλλοντα [23] [24].

Η απαίτηση για καλύτερα μονωτικά υλικά οδήγησε στην χρήση υλικών τρίτης γενιάς νανουλικών, που εμφανίστηκαν τον 21 αιώνα. Τα νανο-υλικά κατασκευάζονται με την προσθήκη ορισμένων πληρωτικών νανοκλίμακας σε μια μήτρα πολυμερούς με αποτέλεσμα να είναι σε θέση να αποδίδουν καλύτερες ηλεκτρικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες κι επιπλέον τείνουν να έχουν μεγαλύτερη αντοχή στη διάσπαση, καθώς και καλύτερη αντίσταση σε υψηλές θερμοκρασίες [21].

Η πρόοδος και οι εξελίξεις στα μονωτικά υλικά ξεκίνησαν στις αρχές του 20ου αιώνα, με αποτέλεσμα να προωθούνται στη δημιουργία νέου ηλεκτρικού εξοπλισμού μεταξύ

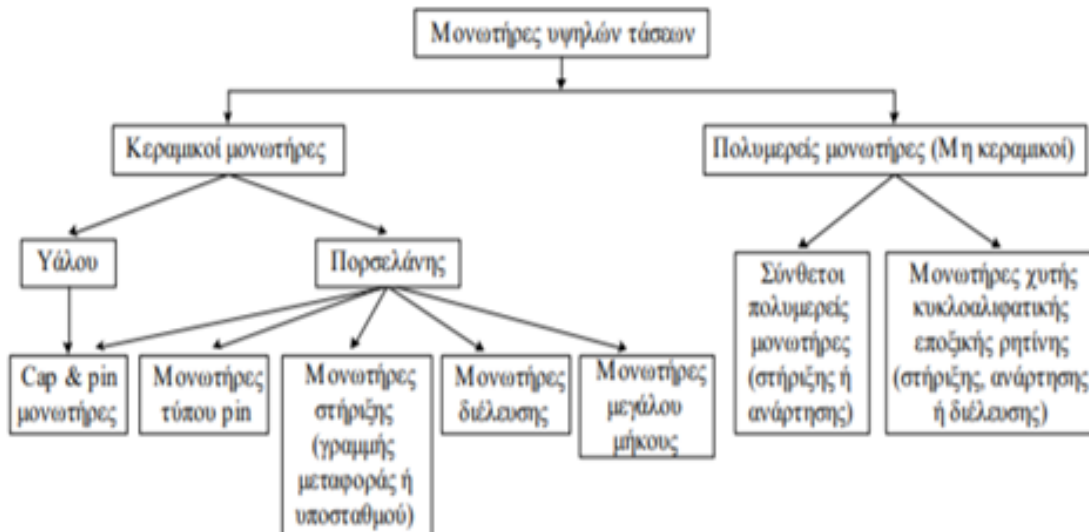
άλλων και στην κατασκευή μονωτήρων μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος. Είναι δε σαφές ότι η απόδοση του ηλεκτρικού εξοπλισμού και των συσκευών καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τις ιδιότητες των μονωτικών υλικών τους [25].

Η αδυναμία εκδήλωσης ουσιαστικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα διηλεκτρικά υλικά έγκειται στο γεγονός ότι σε αυτά δεν υπάρχουν (σε επαρκή ποσότητα) φορείς ηλεκτρικού φορτίου, τέτοιοι που να επιτρέπουν τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος στο εσωτερικό τους. Ωστόσο, η εμφάνιση ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε ένα βαθμό είναι πρακτικά αναπόφευκτη και εμφανίζεται με διττό τρόπο: με αγωγιμότητα δια μέσου της μάζας τους (ειδική αγωγιμότητα όγκου) και με επιφανειακή αγωγιμότητα με μετακίνηση φορέων κατά μήκος της εξωτερικής τους επιφάνειας (ειδική επιφανειακή αγωγιμότητα) [6].

Τα κυριότερα διηλεκτρικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή της μόνωσης των μονωτήρων είναι τα κεραμικά και τα πολυμερή. Το πυρίτιο αποτελεί το κυρίως επαναλαμβανόμενο άτομο στα κεραμικά ενώ αντίστοιχα ο άνθρακας στα πολυμερή υλικά [6].

Η επιλογή των μονωτήρων συνθετικών υλικών και των υλικών κατασκευής τους, οι οποίοι αποτελούν εξάλλου το βασικό στοιχείο της παρούσας έρευνας και θα αναλυθούν διεξοδικότερα, αποκτά σταδιακά όλο και μεγαλύτερο πεδίο εφαρμογής, παγκοσμίως, παρά το γεγονός ότι κεραμικοί και γυάλινοι μονωτήρες χρησιμοποιήθηκαν ευρέως και συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται για πάνω από έναν αιώνα [11]. Οι συνθετικοί μονωτήρες αντικαθιστούν σταδιακά τους συμβατικούς, κεραμικούς και γυάλινους μονωτήρες. Όσον αφορά στο υλικό και το σχήμα των μονωτήρων, παρατίθεται το ακόλουθο διάγραμμα:





Σχήμα 1.1 Κατηγοριοποίηση Μονωτήρων Υψηλών Τάσεων [18]

### 1.2.1 Κεραμικοί μονωτήρες

Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται πιο συχνά στους μονωτήρες είναι τα κεραμικά υλικά (γυαλί ή πορσελάνη). Πρόκειται για την πρώτη τεχνολογία μονωτήρων που υιοθετήθηκε στα δίκτυα, καθώς είναι υλικά με υψηλή διηλεκτρική αντοχή, υψηλή μηχανική αντοχή, μεγάλη διάρκεια ζωής και σχετικά περιορισμένα προβλήματα γήρανσης. Τα μειονεκτήματά τους αντίστοιχα είναι ότι έχουν μεγάλο βάρος και προβληματική συμπεριφορά σε συνθήκες ρύπανσης, γεγονός που συχνά οδηγεί σε απώλεια της μονωτικής συμπεριφοράς [24].

Όσον αφορά το γυαλί είναι ένα υλικό με χαρακτηριστικά μονωτικού υλικού δηλαδή σχετικά μεγάλη διηλεκτρική σταθερά και ειδική αντίσταση, όπως και μικρό θερμικό συντελεστή. Αντίστοιχα, η πορσελάνη είναι σύνθετη ύλη από αργίλιο, πυρίτιο και μαγνήσιο. Οι μονωτήρες από πορσελάνη είναι κατάλληλοι για χρησιμοποίηση σε υψηλές τάσεις, αλλά σε χαμηλές συχνότητες [12].

Ειδικότερα, το γυαλί, είναι ένα μίγμα πυριτικών αλάτων υαλώδους μορφής, χωρίς προσμίξεις. Οι πρώτες ύλες, οι οποίες συνήθως χρησιμοποιούνται για την παρασκευή γυαλιού ως μονωτικού υλικού, είναι το πυρίτιο, ο ασβεστόλιθος, το άνυδρο ανθρακικό νάτριο (σε ενδεικτικά ποσοστά των 57%, 9% και 14% αντίστοιχα). Στην πρακτική του εφαρμογή πάντως στις πλείστες των περιπτώσεων εμπεριέχονται στο υλικό φυσαλίδες αερίων που έχουν παγιδευθεί καθώς και θραύσματα από πυρίμαχο υλικό, με αποτέλεσμα η δομή του υλικού να είναι ατελής.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του σκληρυσμένου γυαλιού το οποίο το καθιστά επιλέξιμο για την κατασκευή μονωτήρων είναι ότι συγκριτικά με την πορσελάνη, επιτρέπει την χρήση λεπτότερων δακτυλίων στις διατάξεις των δισκοειδών μονωτήρων. Αυτό συμβάλλει στην σημαντική αύξηση του μήκους του ερπυσμού, καθώς και στην αύξηση της ονομαστικής τάσης λειτουργίας του μονωτήρα η οποία σύμφωνα με μελέτες μπορεί να αυξηθεί σε ποσοστό έως και 45% [7].

Αντίστοιχα στα κεραμικά υλικά, χρησιμοποιείται συνήθως το διοξείδιο του πυριτίου (silicon dioxide) (το οποίο αποτελεί μια δυαδική ανόργανη ένωση με μοριακό τύπο  $\text{SiO}_2$ ) δηλαδή, η ένωση του πυριτίου με οξυγόνο, σε κρυσταλλική ή άμορφη κατάσταση [26]. Η κρυσταλλική μορφή αναφέρεται ως "χαλαζίας", ενώ η άμορφη σαν άμμος. Κάθε άτομο Si ενώνεται, μέσω ισχυρών ομοιοπολικών δεσμών, με τέσσερα άτομα οξυγόνου. Τα άτομα αυτά του οξυγόνου είναι τετραεδρικά διατεταγμένα γύρω από κάθε άτομο Si. Κάθε άτομο οξυγόνου ενώνεται μέσω επίσης ομοιοπολικού δεσμού με δύο άτομα Si [26]. Η διάταξη αυτή των δεσμών επεκτείνεται προς όλες τις κατευθύνσεις στο πλέγμα του  $\text{SiO}_2$ , με αποτέλεσμα το υλικό να εμφανίζει χρήσιμες ιδιότητες για την τεχνολογία των μονωτήρων όπως μεγάλη σκληρότητα, υψηλό σημείο τήξης, χαμηλή αγωγιμότητα και ελάχιστη διαλυτότητα. Το σχηματιζόμενο υλικό είναι είτε ένα κρυσταλλικό ορυκτό, π.χ. ο χαλαζίας, η δομή του οποίου εξαρτάται από τη θερμοκρασία και αποτελείται από κανονικά τετράεδρα Si-O, είτε μια άμορφη κατάσταση, που είναι γνωστή με την ονομασία τετηγμένος χαλαζίας «fuzed silica». Μέσω της προσθήκης επιπλέον υλικών, δημιουργείται μια ποικιλία πυριτικών αλάτων, κρυσταλλικής ή άμορφης δομής [8].

Στο ελληνικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας οι κεραμικοί μονωτήρες επικρατούν σε ποσότητα, ωστόσο η εγκατάσταση πορσελάνινων μονωτήρων σε νέες κατασκευές έχει σταματήσει αφού θεωρούνται κατάλληλοι μόνο για περιοχές με ελαφρά ρύπανση.

#### 1.2.1.1 Μονωτήρες υάλου

Το γυαλί είναι αποτέλεσμα μιας προοδευτικής υαλοποίησης, χωρίς ίχνος κρυσταλοποίησης, ενός ομογενούς μίγματος ορυκτών οξειδίων σε τηγμένη κατάσταση. Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή του γυαλιού των μονωτήρων είναι βασικά ο Χαλαζίας  $\text{SiO}_2$  σε ποσοστό 70% περίπου, το ανθρακικό Νάτριο  $\text{CO}_3\text{Na}$  σε ποσοστό (περίπου) 15% και ο Δολομίτης  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  σε ποσοστό 15%. Έτσι η

τελική σύνθεση του γυαλιού είναι περίπου:  $\text{SiO}_2$ : 68%,  $\text{Na}_2\text{O}$ : 11%,  $\text{K}_2\text{O}$ : 3,5%,  $\text{CaO}$ : 6,5%,  $\text{Mg}$ : 3,5% και  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : 4%. Η ύπαρξη του οξειδίου του φθορίου ( $\text{F}_2\text{O}_3$ ) στο γυαλί προσδίδει το ελαφρά γαλαζοπράσινο χρώμα [6].



Εικόνα 1.8. Γυάλινος μονωτήρας ανάρτησης cap & pin [16]

Το γυαλί μεταξύ άλλων έχει τις παρακάτω ιδιότητες [6]:

- $\tan\delta$  (50Hz): 0,06
- Ειδική Αντίσταση: 1011  $\Omega\text{m}$
- Τάση εφελκυσμού: 100-120 MPa
- Τάση σύνθλιψης: 700 MPa
- Σχετική διηλεκτρική σταθερά (25°C, 50Hz): 7

Οι μονωτήρες από γυαλί αντέχουν σε δονήσεις και ισχυρούς κραδασμούς. Έχουν υψηλότερη διηλεκτρική αντοχή σε σύγκριση με την πορσελάνη ενώ ο συντελεστής θερμικής διαστολής είναι χαμηλός. Οι γυάλινοι μονωτήρες έχουν επίσης μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό και δεν θερμαίνονται στο φως του ήλιου, σε αντίθεση με την πορσελάνη. Επίσης, η οπτική επιθεώρηση από πλευράς φυσαλίδων και ομοιογένειας είναι εύκολη. Ωστόσο, οι ρωγμές με το πέρασμα του χρόνου και τις θερμικές καταπονήσεις μεγαλώνουν, προχωρούν στο εσωτερικό και ελαττώνουν την αντοχή του μονωτήρα (γήρανση μονωτικού).

Ένα επιπλέον αρνητικό χαρακτηριστικό των μονωτήρων που είναι κατασκευασμένοι από γυαλί, είναι ότι μπορούν να αποθηκεύουν ενέργεια σε

καταστάσεις μηχανικών καταπονήσεων. Όταν η ενέργεια αυτή απελευθερώνεται στη συνέχεια είτε λόγω της μηχανικής κρούσης ή ως συνέπεια διάβρωσης του μονωτήρα τότε ο μονωτήρας διασπάται σε μικρά κομμάτια, τα οποία εκτοξεύονται με μεγάλη δύναμη. Για τους παραπάνω λόγους οι βιομηχανικές εφαρμογές των μονωτήρων από γυαλί είναι περισσότερο περιορισμένες σε σχέση με τις αντίστοιχες εφαρμογές των μονωτήρων από πορσελάνη. Στις ηλεκτρολογικές εφαρμογές η χρήση του γυαλιού, το οποίο έχει υποστεί σκλήρυνση, αφορά κατά κύριο λόγο τους μονωτήρες τύπου “cap and pin” (ανάρτησης) ή σε στύλους στήριξης δικτύων καθώς και σε στύλους πολλαπλών κώνων [7].

### 1.2.1.2 Μονωτήρες πορσελάνης

Η πορσελάνη ή αλλιώς πυριτικό άλας του αργιλίου και του καλίου σχηματίζεται από συσσωμάτωση μειγμάτων αργιλίου, χαλαζία και αστρίου (κάλιο-αλουμινο πυρίτιο). Η πορσελάνη υψηλού μηχανικού και διηλεκτρικού βαθμού σχηματίζεται από οξειδία αλουμινίου, οξειδία βαρίου και αργιλίου. Η πορσελάνη είναι χημικά αδρανής και έχει ικανοποιητικές διηλεκτρικές ιδιότητες για εφαρμογές σε συχνότητες ισχύος, όπου χρησιμοποιείται ευρέως. Οι μηχανικές ιδιότητες και η αντοχή σε θερμική καταπόνηση είναι χαμηλές. Σοβαρό μειονέκτημα τους αποτελεί το γεγονός ότι είναι εύθραυστοι, είναι δυνατό να υποστούν ρωγμές ή διάτρηση στο σώμα τους. Μάλιστα, μπορεί να υφίσταται ρωγμή εσωτερικά χωρίς καμία εξωτερική ένδειξη μέχρι να επέλθει ολική καταστροφή του μονωτήρα [6].

Η πορσελάνη που έχει υποβληθεί σε διαδικασία εφυάλωσης<sup>2</sup> χρησιμοποιείται εκτενώς για μόνωση σε γραμμές μεταφοράς, διακόπτες κυκλώματος και σπινθηριστές. Στη χαμηλή τάση χρησιμοποιείται σε διακόπτες, ακροκιβώτια, τμήματα ασφαλειών και βάσεις ρευματοδοτών

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν την ηλεκτρική πορσελάνη είναι η διηλεκτρική αντοχή, η διηλεκτρική σταθερά, η εφαπτομένη απωλειών, η ειδική αντίσταση όγκου και η θερμοκρασία  $T_c$  (δηλαδή, η απαιτούμενη ελάχιστη θερμοκρασία σε βαθμούς C, για να εκδηλωθεί αντίσταση όγκου ίση με  $10^6 \Omega \text{ cm}$ .

---

<sup>2</sup> Πριν από το ψήσιμο οι μονωτήρες εφυαλώνονται. Εφυάλωση λέμε την επικάλυψη του μονωτήρα εξωτερικά με ένα είδος γυαλιού. Η εφυάλωση επιτυγχάνεται βυθίζοντας το ήδη στεγνό κομμάτι του μονωτήρα σε διάλυμα κατάλληλων οξειδίων σε νερό. Η επικάλυψη αυτή κατά το ψήσιμο μετατρέπεται σε γυαλί. Το στρώμα της εφυάλωσης έχει συντελεστή διαστολής μικρότερο από αυτόν του κεραμικού υλικού, ώστε να εξασκεί σ' αυτό μια συμπίεση, γι αυτό ονομάζεται εφυάλωση τύπου συμπίεσης [12].

Επειδή οι διαστάσεις των κατασκευών συνήθως καθορίζονται από τις μηχανικές και θερμικές απαιτήσεις, οι ηλεκτρικές ιδιότητες σε πολύ λίγες περιπτώσεις αποδεικνύονται καθοριστικές για την εύρυθμη λειτουργία του μονωτήρα.

Ιδιότητα	Μονάδα μέτρησης	Πυριτική πορσελάνη	Αργιλική πορσελάνη	Σκληρυμένο γυαλί
Διηλεκτρική σταθερά 50-60Hz	-	5.0-6.5 4.8-5.6	6.0-7.5 5.0-6.5	7.3-7.5 7.1-7.5
Εφαπτομένη απωλειών	$\times(10^{-3})$	10.0-25.0 5.0-12.0	12.0-30.0 5.0-12.0	15.0-60.0 5.0-12.0
Διηλεκτρική αντοχή 5—60Hz 20°C	kV/mm	10.0-20.0	10.0-20.0	>250
Διηλεκτρική αντοχή 1/5μs	kV/mm	40.0-50.0	40.0-50.0	170.0-220.0
$\rho$ =ειδική αντίσταση όγκου	$\Omega \cdot \text{cm}$	$10^{13}$ $10^6$	$10^{12}$ $10^{11}$	$10^{13}$ $10^5-10^6$
$T_e$ =θερμοκρασία για $\rho=10^6 \Omega \text{ cm}$	°C	280-340	830-1070	270-400

Πίνακας 1.1 Ηλεκτρικές ιδιότητες της πυριτικής πορσελάνης, της αργιλικής πορσελάνης και του γυαλιού [18]



Εικόνα 1.9 Μονωτήρες διέλευσης από πορσελάνη [16]

### 1.2.2 Συνθετικοί μονωτήρες

Προκειμένου να σχηματιστούν αλυσίδες και δακτύλιοι που μπορούν να συνδέονται σταυροειδώς σε πολύπλοκες δομές σχηματίζοντας μακρομόρια, ο άνθρακας ενώνεται με άνθρακα, όπως επίσης και με υδρογόνο, οξυγόνο και άλλα στοιχεία. Τα καθαρά

πολυμερή αποτελούνται από ένα επαναλαμβανόμενο βασικό είδος μορίων, και είναι απαλλαγμένα από ξένες ουσίες. Αυτά σπάνια χρησιμοποιούνται στην κατασκευή μονωτήρων, καθώς η τακτική παγκοσμίως είναι να χρησιμοποιούνται συμπολυμερή και ορυκτά πληρωτικά μέσα για την επίτευξη των επιθυμητών μηχανικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων των παραγόμενων προϊόντων [27].

Τα μονωτικά υλικά των πολυμερών μονωτήρων, είναι σε σχέση με τα κεραμικά υλικά αρκετά ελαφρύτερα αλλά και πολύ ανθεκτικότερα στις κάθε είδους μηχανικές καταπονήσεις. Μεταξύ των υλικών αυτών, τα πιο γνωστά χρησιμοποιούμενα λόγω και του χαμηλού κόστους τους είναι οι θερμοπλαστικές εποξειδικές ρητίνες, οι οποίες ωστόσο χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε εσωτερικούς χώρους για την αποφυγή αλλοίωσης της χημικής τους σύστασης από την ηλιακή ακτινοβολία (φαινόμενο φωτόλυσης).

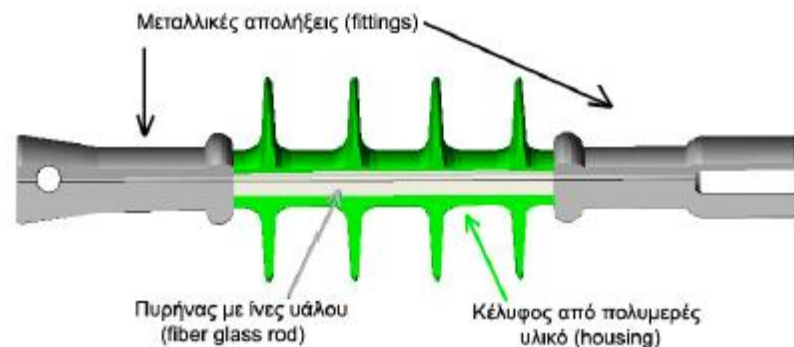
Ένα ακόμα είδος υλικών πολυμερών μονωτήρων είναι οι κυκλοαλειφατικές ρητίνες, οι οποίες εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή στην φωτόλυση και άρα χρησιμοποιούνται και σε εξωτερικούς χώρους και τείνουν να αντικαταστήσουν σταδιακά την πορσελάνη και το γυαλί στην κατασκευή των μονωτήρων [26].

Μια ακόμα σημαντική κατηγορία συνθετικών μονωτικών είναι οι ελαστομερείς ρητίνες σιλικόνης, οι οποίες έχουν σημαντική ανθεκτικότητα στην καύση και επίσης υπόκεινται σε μόνιμες βλάβες από τον ερπυσμό και τις μερικές εκκενώσεις (όπως οι οργανικές ρητίνες) δεδομένου ότι ο σκελετός τους αποτελείται από πυρίτιο [28].

Η πιο συνηθισμένη εφαρμογή των συνθετικών μονωτήρων είναι η χρήση τους για την ανάρτηση ή στήριξη των γραμμών μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Στις εν λόγω γραμμές γίνεται η χρήση αγωγών μεγάλης διατομής (16-35-95mm<sup>2</sup>) ώστε να περιοριστούν οι ηλεκτρικές απώλειες στα μεγάλα μήκη αγωγών του δικτύου διανομής, οπότε τα μηχανικά φορτία (βάρος, βέλος κάμψης, αιώρηση λόγω ανέμων) που προκύπτουν είναι πολύ μεγαλύτερα από εκείνα που μπορούν να αντέξουν οι συνήθεις μονωτήρες ανάρτησης γυαλιού ή πορσελάνης. Οι συνθετικοί μονωτήρες πολύ δύσκολα προσβάλλονται από τις συνήθεις ηλεκτρικές βλάβες και επιδράσεις χειρισμού,

Οι συνθετικοί μονωτήρες είναι παρόμοιοι με τους πορσελάνινους μονωτήρες μεγάλου μήκους ως προς το σχήμα, παρ'όλα αυτά διαφέρουν αρκετά ως προς τα υλικά κατασκευής τους και ως προς τη βασική δομή τους η οποία είναι η ακόλουθη [21]:

- Πυρήνας με ίνες υάλου ( Glass Fiber Reinforced Plastic)
- Μεταλλικοί ακροδέκτες (Metal End Fitting)
- Πολυμερικό περίβλημα (Polymeric Housing)



Εικόνα 1.10. Τομή σε μοντέλο συνθετικού μονωτήρα όπου διακρίνονται το πολυμερικό περίβλημα, ο πυρήνας και οι μεταλλικοί ακροδέκτες [29]

Ο πυρήνας, είναι το εσωτερικό μονωτικό μέρος του πολυμερούς μονωτήρα και μεταφέρει το μηχανικό φορτίο. Αποτελείται κυρίως από ίνες γυαλιού που βρίσκονται σε μάζα ρητίνης, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη δύναμη εφελκυσμού.

Ένα ελαστομερές περίβλημα προστατεύει τον πυρήνα από τις καιρικές συνθήκες. Το περίβλημα του μονωτήρα έχει κρίσιμο ρόλο στη λειτουργία του αφού φέρει την κατάλληλη διαμόρφωση (κυάθια) για την επίτευξη του απαιτούμενου μήκους ερπυσμού, παρέχει μια διακοπτόμενη διαδρομή για την αποστράγγιση του νερού, ενώ ταυτόχρονα προστατεύει τον πυρήνα από την εισχώρηση υγρασίας.

Τα κυρίαρχα υλικά στην κατασκευή του περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων τρίτης πλέον γενιάς είναι τα ελαστομερή αιθυλενίου-προπυλενίου-διενίου (Ethylene Propylene Diene Monomer - EPDM) και τα μονωτικά ελαστομερή σιλικόνης (Silicone Rubber - SiR) με πολυδιμεθυλοσιλοξάνη (Polydimethylsiloxane - PDMS) με ανόργανες πρόσθετες προσμίξεις (fillers). Τα τελευταία μάλιστα υπερέχουν κατά πολύ σε ποσοστά εφαρμογής παγκοσμίως [6].

Οι μεταλλικοί ακροδέκτες μεταδίδουν το μηχανικό φορτίο στον πυρήνα. Οι μεταλλικοί ακροδέκτες (metal end fittings) κατασκευάζονται συνήθως είτε από μηχανικά

κατεργασμένο αλουμίνιο, είτε από χυτό ή από σφυρήλατο ατσάλι, πρεσάρονται στα άκρα του πυρήνα με πολυγωνικές πρέσες [8].

Θα πρέπει να διασφαλίζουν μηχανική αντοχή και αντοχή στη διάβρωση ενώ το σχήμα τους πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να περιορίζεται η εμφάνιση στεμματοειδών εκκενώσεων (corona discharges) στη διεπιφάνεια μεταξύ μετάλλου και πολυμερούς, φαινόμενο το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση του πολυμερούς, με αποτέλεσμα τελικά την καταστροφή του μονωτήρα λόγω εισχώρησης υγρασίας στον πυρήνα [8].

Πολυμερή υλικά υψηλής απόδοσης χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές για περίπου 50 χρόνια ενώ η χρήση τους συνεχώς αυξάνεται σταθερά, και σήμερα τα πολυμερή υλικά επιλέγονται ως τα κατεξοχήν μονωτικά υλικά. Η προσφορά των πολυμερών υλικών είναι ότι προσφέρουν ποικίλα πλεονεκτήματα σε σχέση με την πορσελάνη καθώς παρουσιάζουν μια σειρά ιδιοτήτων. Καταρχάς έχουν χαμηλό βάρος. Δηλαδή καθώς η πυκνότητα των πολυμερών υλικών είναι κατά πολύ χαμηλότερη από τα κεραμικά, αυτό έχει ως αποτέλεσμα ότι υφίσταται μια σημαντική μείωση στο βάρος τους. Το χαμηλό βάρος τους σημαίνει ότι τα εξαρτήματα από πολυμερή υλικά δεν απαιτούν ανυψωτικά μηχανήματα για την εγκατάσταση και χρήση τους στη συνέχεια [8].

Επίσης το χαμηλότερο βάρος τους, επιτρέπει τη χρήση υποστηρικτικών διατάξεων και δομών που επίσης είναι ελαφρύτερες. Παράλληλα το μικρότερο μέγεθός τους, αλλά και βάρος συμβάλλει στο μειωμένο κόστος μεταφοράς τους συγκριτικά με τα εξαρτήματα από πορσελάνη. Οι πολυμερείς μονωτήρες έχουν το πλεονέκτημα κατά τη χρήση τους σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές ότι μπορούν να τοποθετηθούν σε στενούς περιορισμένους χώρους σε αντίθεση με τους μη κεραμικούς μονωτήρες οι οποίοι χρειάζονται μεγαλύτερο χώρο και μεγαλύτερα ανοίγματα ώστε να τοποθετηθούν [12]. Οι κατασκευαστές των συνθετικών μονωτήρων έχουν καταφέρει να μειώσουν την μεγάλη ευαισθησία τους στην ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που ασκείται στα άκρα των κυathίων του με αποτέλεσμα να μειώνονται αρνητικές συνέπειες όπως ο θόρυβος, η ηλεκτρομαγνητική ρύπανση και η γήρανση [12].

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό το οποίο αποτελεί πλεονέκτημα για τους πολυμερείς μονωτήρες είναι ότι έχουν μειωμένη επιφανειακή ρύπανση, και υδροφοβικότητα [12].



Ειδικότερα, οι δεσμοί των μορίων πολυμερών είναι ασθενείς γεγονός που συμβάλλει στο να μην παρατηρείται μεγάλη επιφανειακή ρύπανση λόγω παράλληλα και των αρκετά χαμηλών τιμών της ελεύθερης επιφανειακής ενέργειας. Η κύρια αλυσίδα της δομής των υλικών των συνθετικών πολυμερών δομείται από επαναλαμβανόμενους δεσμούς πυριτίου – οξυγόνου. Κάθε δεσμός πυριτίου (Si) οξυγόνου συνδέεται με δύο ομάδες μεθυλίου ( $-CH_3$ ) οι οποίες περιορίζουν την επίδραση του ισχυρού δεσμού πυριτίου οξυγόνου στο εσωτερικό της δομής του μορίου, με αποτέλεσμα να παρέχουν τα επιθυμητά υδρόφοβα χαρακτηριστικά στην επιφάνεια του πολυμερούς όπως επίσης ανθεκτικότητα στην υγρασία και την ατμοσφαιρική ρύπανση [6].

Το νερό στην επιφάνεια υδρόφοβων υλικών σχηματίζει σταγόνες με αποτέλεσμα οι ρυπαντές να διαλύονται από τις σταγόνες νερού οι οποίες δεν έχουν ενωθεί μεταξύ τους και το αγωγίμο μέρος να μην είναι συνεχές. Το γεγονός αυτό έχει παράλληλα ως αποτέλεσμα την μειωμένη ροή ρεύματος διαρροής και την πιθανότητα σχηματισμού ξηρών ζωνών που με τη σειρά τους απαιτούν την εφαρμογή υψηλότερης τάσης για να προκληθεί υπερπήδηση. Συγκριτικά με την πορσελάνη, κάποια πολυμερή υλικά διαθέτουν μεγαλύτερη συνήθως αντοχή στην υπερπήδηση, ακόμα κι αν έχουν χρησιμοποιηθεί επί χρόνια [26].

Η διαδικασία της παραγωγής των πολυμερών μονωτήρων καθώς και οι τρόποι βελτιστοποίησης της απόδοσής τους καθώς και της διάρκειας ζωής τους αποτελεί επίσης ένα σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τους μονωτήρες πορσελάνης. Ειδικότερα η διαδικασία παραγωγής των πολυμερών μονωτήρων είναι πιο σύντομη συγκριτικά με την διαδικασία παραγωγής των μονωτήρων πορσελάνης κι αυτό μάλιστα παρά το γεγονός της εκτενούς χρήσης πρόσθετων (fillers) σε κατάλληλες κατά περίπτωση συγκεντρώσεις προκειμένου να ενισχύονται οι ιδιότητες των πολυμερών υλικών [4].

Στόχος των πρόσθετων είναι να διευκολύνουν την κατεργασία του πολυμερούς ή/και να προσδώσουν στο τελικό προϊόν τις επιθυμητές ιδιότητες. Ως προς την συμβατότητα των πρόσθετων με το πολυμερές υλικό αυτή καθορίζεται από το μηχανισμό δράσης: αν η επίδραση είναι σε μοριακό επίπεδο τότε γίνεται λόγος για επιθυμητή πλήρης συμβατότητα. Αν η δράση τους επικεντρώνεται στη διεπιφάνεια του πολυμερούς τότε γίνεται λόγος για επιθυμητή μερική συμβατότητα. Αν τέλος η δράση τους γίνεται

αποκλειστικά στη βάση των δικών τους τους ιδιοτήτων τότε το πρόσθετο είναι μη-συμβατό με το πολυμερές [25].

Οι βελτιωτικές προσμίξεις είναι: διαλύτης, προσθετικά ενίσχυσης της δομής, παράγοντας ενίσχυσης του βαθμού προσκόλλησης (adhesion promoter), χρώμα και άλλες προσμίξεις. Ειδικότερα μεταξύ των πρόσθετων για την ενίσχυση των ιδιοτήτων των πολυμερών υλικών συμπεριλαμβάνονται αντιοξειδωτικά, πλαστικοποιητές, χρωστικές ουσίες, καθώς και άλλα πρόσθετα βοηθητικά μέσα όπως καταλύτες, παρεμποδιστές ανάφλεξης, απορροφητές υπερϊώδους ακτινοβολίας και αντιδιαβρωτικά. Στις πλείστες των περιπτώσεων τα πρόσθετα και τα πληρωτικά μαζί επηρεάζουν θετικά στην συνολική απόδοση του υλικού των συνθετικών μονωτήρων τόσο ανεξάρτητα το καθένα όσο και σε συνδυασμό όλα μαζί [30].

Βέβαια θα πρέπει να επισημανθεί ότι υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα των πολυμερών μονωτήρων σε σχέση με τους μονωτήρες πορσελάνης. Ένα από τα μειονεκτήματα αυτά είναι ότι υπόκεινται σε χημική και φωτοχημική προσβολή. Ειδικότερα το σύνολο των πολυμερών υλικών, αποσυντίθεται σε θερμοκρασία κάποιων εκατοντάδων βαθμών και υπόκεινται σε φωτο-οξειδωτική αποδόμηση. Αυτό σημαίνει ότι οι επιφανειακοί χημικοί δεσμοί τους μετά την πρόσπτωση της υπερϊώδους ακτινοβολίας καταστρέφονται γεγονός που σημαίνει ότι ενδέχεται να αντιδράσουν κατά τη λειτουργία τους με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο και να προκληθούν επιφανειακές ηλεκτρικές εκκενώσεις [21].

Το βασικότερο μειονέκτημα των πολυμερών, εντοπίζεται στο ότι το κύριο στοιχείο τους δηλαδή ο άνθρακας, στις περισσότερες των περιπτώσεων αποτελεί έναν καλό ηλεκτρικό αγωγό. Η ενδεχόμενη προσβολή της επιφάνειας των πολυμερών, κυρίως από τις έρπουσες μερικές εκκενώσεις έχει ως αποτέλεσμα την τοπική αύξηση της θερμοκρασίας, δημιουργώντας τελικά τοπικά αγωγίμες επιφανειακές οδούς οι οποίες είναι πιθανό να προκαλέσουν επιφανειακή διάσπαση και παράλληλα ανάπτυξη πολύ υψηλών θερμοκρασιών στην επιφάνεια του μονωτήρα με αποτέλεσμα την καταστροφή του [1].

Το υψηλό κόστος των πρώτων υλών για την δημιουργία των πολυμερών μονωτήρων σε σχέση με το υλικό κατασκευής της πορσελάνης, είναι επίσης ένα σημαντικό μειονέκτημά τους. Έτσι συνήθως στο βασικό πολυμερές υλικό αναμιγνύονται

πρόσθετα και πληρωτικά υλικά, προκειμένου να μειωθεί το κόστος κατασκευής τους, και παράλληλα για να αυξηθεί η απόδοσή τους και η διευκόλυνση της διαδικασίας παραγωγής τους. Έτσι το βασικό πολυμερές υλικό μπορεί κατά περίπτωση να συμβάλλει στο βάρος του τελικού υλικού κατά 30% έως 70%. [27].

Ένα ακόμα μειονέκτημα των πολυμερών υλικών είναι η μείωση της μηχανικής αντοχής τους. Συνήθως οι πολυμερείς μονωτήρες ούτε είναι δύσκαμπτοι ούτε μπορούν να υποστηριχτούν από μόνοι τους. Όταν κατά περίπτωση είναι αναγκαία η εξασφάλιση μηχανικής αντοχής, τότε χρησιμοποιούνται συνήθως κεραμικοί πυρήνες οι οποίοι ενισχύονται με διάφορα υλικά σωληνώσεων τα οποία είναι καλυμμένα από το πολυμερές υλικό. Αυτό, προκειμένου να εξασφαλισθεί η αντοχή των πολυμερών μονωτήρων στις δυσμενείς καιρικές συνθήκες [31].



Εικόνα 1.11 Διάφορα σχέδια συνθετικών μονωτήρων (αριστερά)- μεταλλικός ακροδέκτης (δεξιά) συνθετικού μονωτήρα [32]

## 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

### 2.1 Δοκιμές στους συνθετικούς μονωτήρες

Η ζήτηση για συνθετικούς μονωτήρες έχει αυξηθεί σημαντικά και κατά συνέπεια έχει επίσης αυξηθεί και ο αριθμός των «νέων» κατασκευαστών τους. Αυτή η κατάσταση οδηγεί σε μεγαλύτερο εμπορικό ανταγωνισμό ενώ παράλληλα προϊόντα απελευθερώνονται στο δίκτυο αγοράς με πολύ περιορισμένη μακροπρόθεσμη εμπειρία. Αυτό ώθησε να εφαρμοστούν πρόσθετες δοκιμές στους μονωτήρες, που είναι εύκολο να εκτελεστούν, να συμπληρώνονται αναφορές προτύπων δοκιμών για τα προϊόντα και να παρέχονται περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την αναμενόμενη απόδοση, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα, με τα αποτελέσματα προϊόντων με γνωστές μακροπρόθεσμες επιδόσεις υπό συνθήκες λειτουργίας (εντός δικτύου) [25].

Οι συνθετικοί μονωτήρες έχουν χρησιμοποιηθεί σε δίκτυα διανομής και μεταφοράς ενέργειας για περισσότερα από τέσσερις δεκαετίες και υπάρχει πλέον πληθώρα σχεδίων και τεχνολογιών κατασκευής.

Η κατανόηση των μηχανισμών, που σχετίζονται με την αξιόπιστη συμπεριφορά των μονωτήρων κατά την λειτουργία τους, παρέχεται από ερευνητές και από την εμπειρία στο πεδίο εφαρμογής παγκοσμίως. Τα πρότυπα προϊόντων καθιερώθηκαν από τη δεκαετία του '90 και με το πέρασ του χρόνου βελτιώθηκαν. Αυτά καθορίζουν τα κριτήρια δοκιμής που πρέπει να ικανοποιηθούν και με βάση αυτά τα κριτήρια παρέχουν την απαραίτητη καθοδήγηση για τη ανάπτυξη των υλικών και διαδικασιών κατασκευής [25].

Η διαθεσιμότητα αυτών των πολύπλοκων πληροφοριών είχε ως αποτέλεσμα στην εμπορικά καθοδηγούμενη αντίληψη ότι οι συνθετικοί μονωτήρες είναι ένα απλό βασικό προϊόν, εύκολο στην παραγωγή που αποτελείται μόνο από τρία κύρια μέρη (ράβδος, περίβλημα και άκροεξαρτήματα). Ωστόσο, είναι κοινώς αποδεκτό για όλους τους συνθετικούς μονωτήρες ότι πρέπει να πραγματοποιούνται μικροσκοπικές και μακροσκοπικές δοκιμές οι οποίες είναι πάρα πολύ σημαντικές για τη λειτουργία τους στο δίκτυο. Η συμμόρφωση με τα πρότυπα πρέπει να είναι αποδεδειγμένη σε όλες τις δοκιμές σχεδιασμού του προϊόντος.

Εάν οι δοκιμές σχεδιασμού είναι επιτυχημένες, ισχύουν για όλους τους συνθετικούς μονωτήρες εντός ενός συγκεκριμένου εύρους σχεδιασμού.

Οι πρόσφατες εργασίες στην CIGRE (International Council on Large Electric Systems) και στην IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers) όπως επίσης και στις επιτροπές διεθνών προτύπων IEC (International Electrotechnical Commission) ANSI (The American National Standards Institute) επικεντρώθηκαν σε 2 κύριες πτυχές:

- Αξιολόγηση της κατάστασης του μονωτή κατά την διάρκεια και μετά την λειτουργία του
- Επιθεώρηση των συνθετικών μονωτήρων πριν από την τοποθέτησή τους στο δίκτυο [25]

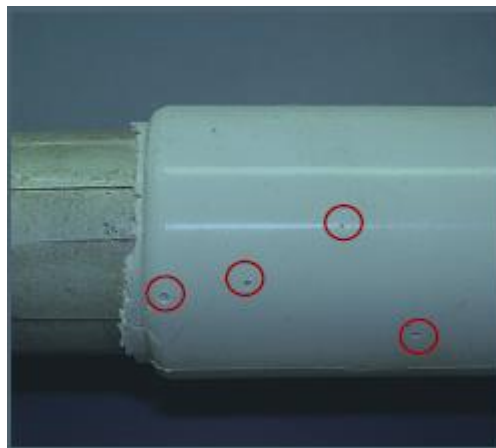
Αυτός ο τεράστιος όγκος σήμερα σε παραγγελίες συνθετικών μονωτήρων απαιτεί εντατικοποίηση των δοκιμών των δειγμάτων, ιδίως όταν είναι κυκλοφορούν μονωτήρες από νέους κατασκευαστές ή ο χρήστης έχει περιορισμένη εμπειρία συνεργασίας με τον προμηθευτή. Αυτή η απαίτηση δικαιολογείται ακόμη και εάν οι δοκιμές σχεδιασμού ενός κατασκευαστή ήταν πρόσφατα επιτυχημένες. Πρέπει επίσης να ληφθεί μέριμνα ώστε οι αναφορές δοκιμών να παραμένουν σε ισχύ ακόμα και όταν υπάρχει εξέλιξη και ανάπτυξη νέων καλύτερων, θεωρητικά, υλικών. Μια δοκιμή σχεδιασμού 15ετίας, μπορεί να μην καλύπτει τις πραγματικές συνθέσεις των σημερινών υλικών [25].

Υπάρχουν σχετικά απλές δοκιμές δειγμάτων που βοηθούν στη διασφάλιση σταθερής ποιότητας σε σχέση με τον όγκο τους. Στην παρακάτω αρθρολογία θα αναλύσουμε την δομή ενός προγράμματος δοκιμών. Οι προτεινόμενες δοκιμές δεν είναι ειδικές, αφορούν όλα τα είδη μονωτήρων ανεξαρτήτως υλικού, σχεδιασμού ή κατασκευαστή. Αντίθετα, το πρόγραμμα είναι μια συλλογή από υπάρχουσες τυποποιημένες με αποδεδειγμένη φιλοσοφία δοκιμές, στηριζόμενες σε πρόσφατες επιστημονικές εργασίες. Αυτές οι δοκιμές μπορούν και πρέπει να γίνουν κατά τη διάρκεια της επιθεώρησης αλλά επίσης και κατά την παραλαβή των μονωτήρων πριν την αποθήκευσή τους. Αυτή η διαδικασία πρέπει να αναφέρεται στη σύμβασή και να περιλαμβάνει αυστηρές διατάξεις σε περίπτωση αστοχίας δοκιμής, έτσι ώστε οι προμηθευτές γνωρίζουν εκ των προτέρων για τον κίνδυνο εφοδιασμού φτωχών ποιοτικά υλικών ή μονωτήρων [61].

## 2.2 Δομή προγράμματος Δοκιμών-Προτεινόμενες Δοκιμές

### 2.2.1 Οπτική επιθεώρηση

Η οπτική επιθεώρηση είναι ο ευκολότερος έλεγχος για ένα συνθετικό μονωτήρα απαιτεί όμως έναν έμπειρο επιθεωρητή. Η πρόσφυση γενικά είναι ο αποφασιστικός παράγοντας για το πόσο καλά διατηρείται το περίβλημα επαφής με τον άξονα του πυρήνα και τους ακροδέκτες. Η εμφάνιση της επιφάνειας του περιβλήματος είναι συχνά ένας δείκτης για την ποιότητα της διαδικασίας της χύτευσης του ελαστομερούς περιβλήματος. Εάν βρεθούν κενά (Εικόνα 2.1), είναι ένας πιθανός δείκτης απώλειας πίεσης ή ενός κακά προσαρμοσμένου καλουπιού. Αυτό συχνά οδηγεί σε μια κατάσταση που η διεπαφή μεταξύ του ακροδέκτη αλλά και του άξονα του πυρήνα με το περίβλημα είναι ανεπαρκώς συνδεδεμένη (Εικόνα 2 2). Σε αυτή τη συγκεκριμένη περίπτωση, δεν απαιτείται δοκιμή βρασμού για την ανίχνευση της ασθενής συγκόλλησης - το περίβλημα είναι πολύ εύκολα αφαιρούμενο.



Εικόνα 2.1. Κενά στο ελαστομερές περίβλημα συνθετικού μονωτήρα [25]



Εικόνα 2.2. Έλλειψη σύνδεσης στα ακροκιβώτια συνθετικού μονωτήρα [25]

## 2.2.2 Έλεγχος υλικών

### 2.2.2.1 Δοκιμή συγκόλλησης

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η κοπή τετραγώνων στην επιφάνεια του συνθετικού περιβλήματος που διεισδύει στον πυρήνα του άξονα. Μία πένσα χρησιμοποιείται για να πιάσει και να τραβήξει τα τετράγωνα σιλικόνης κάθετα από την επιφάνεια της ράβδου (Εικόνες 2.3-2.4). Αυτή η εύκολη δοκιμή εκτελείται στο περίβλημα δύο φορές, πριν και μετά από βρασμό. Χρησιμοποιείται η διαδικασία βρασμού σύμφωνα με το IEC 61109: τα δείγματα διατηρούνται βυθισμένα σε δοχείο βρασμού σε διάλυμα που αποτελείται από απιονισμένο νερό με 0,1% NaCl (άλας) κατά βάρος, για 42 ώρες.



Εικόνα 2.3. Κοπή τετραγώνων στο συνθετικό περίβλημα [25]



Εικόνα 2.4. Τράβηγμα τετραγώνων με την βοήθεια πένσας [25]

Η καλή συγκόλληση στη ράβδο θα πρέπει να έχει ως αποτέλεσμα την γενική συνεκτική αστοχία του ελαστομερούς (Εικόνα 2.5) και όχι την αστοχία κόλλησης μεταξύ του ελαστομερούς και της ράβδου (Εικόνα 2.2). Ο στόχος αυτής της δοκιμής είναι πρώτον να εξακριβώσει εάν το ο μονωτής έχει οποιαδήποτε μορφή σύνδεσης μεταξύ του καουτσούκ και του πυρήνα και επίσης πόσο ισχυρός είναι αυτός ο δεσμός. Εάν ο συνθετικός μονωτήρας είναι σχεδιασμένος ώστε το περίβλημα του να έχει επικαλύψει μέρος των ακροδεκτών μπορεί να αξιολογηθεί η σύνδεση μεταξύ του ακροδέκτη και του περιβλήματος με τον ίδιο τρόπο.



Εικόνα 2.5. Παράδειγμα καλής συγκόλλησης [25]

#### 2.2.2.2 Μέτρηση Πυκνότητας

Ο απαραίτητος εξοπλισμός περιλαμβάνει ζυγαριά εξοπλισμένη με ειδικό στέλεχος. Η ζυγαριά θα πρέπει να μπορεί να μετρήσει με ακρίβεια  $\pm 1$  mg. Η μέτρηση της πυκνότητας μπορεί επίσης να εφαρμοστεί σε κομμάτια ράβδου. Τα δείγματα του περιβλήματος πρέπει να κοπούν από τον συνθετικό μονωτήρα και να δοκιμάστουν σύμφωνα με το πρότυπο ISO 2781[33] το οποίο προβλέπει 2 βασικές μετρήσεις:

Στη μέθοδο Α, η μάζα του δοκιμίου και η μάζα του νερού η οποία ισούται με τον όγκο του δοκιμίου, προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας μια ζυγαριά ακριβείας, εξοπλισμένη με ειδικό στέλεχος για αυτή τη μέτρηση (βλ. Εικόνα 2.6). Η μέθοδος Β αποτελεί επίσης μια καταστρεπτική δοκιμή και χρησιμοποιείται μόνο όταν είναι απαραίτητο να τεμαχιστεί το δοκίμιο σε μικρά κομμάτια για να εξαλειφθούν οι χώροι αέρα εντός του υλικού. Οι μετρήσεις γίνονται χρησιμοποιώντας ένα δοχείο όγκου και ζυγό ακριβείας. Το πρότυπο προβλέπει (για τα νέα δείγματα ελαστομερών) τα κομμάτια και τα δοκίμια να προστατεύονται από άμεσο ηλιακό φως μεταξύ βουλκανισμού και δοκιμής. Τα κομμάτια θα πρέπει να προετοιμάζονται σε τυπική θερμοκρασία περιβάλλοντος εργαστηρίου (δηλαδή,  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  ή  $27^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ) για τουλάχιστον 3 ώρες πριν από την



κοπή των δοκιμίων από αυτά. Στην ίδια θερμοκρασία θα πρέπει να διεξάγονται και οι εργαστηριακές μετρήσεις. Τα δοκίμια μπορούν να δοκιμαστούν αμέσως αλλά, εάν αυτό δε γίνει, θα πρέπει να φυλαχτούν σε τυπική θερμοκρασία εργαστηρίου έως ότου γίνουν οι δοκιμές [33].

Η προκύπτουσα πυκνότητα πρέπει να συμμορφώνεται με το φύλλο δεδομένων του υλικού του περιβλήματος (για παράδειγμα, ελαστομερές σιλικόνης HTV  $> 1,5 \text{ g / cm}^3$ , ελαστομερές σιλικόνης LSR  $< 1,2 \text{ g / cm}^3$ ) [25].



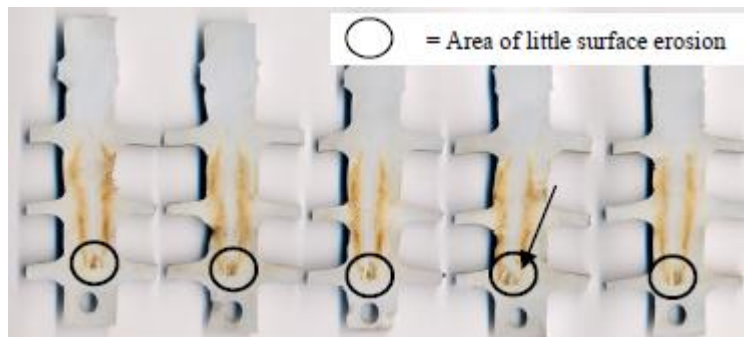
Εικόνα 2.6. Σύγχρονη ζυγαριά ακριβείας [34]

### 2.2.2.3 Δοκιμές αγωγίων οδεύσεων και διάβρωσης

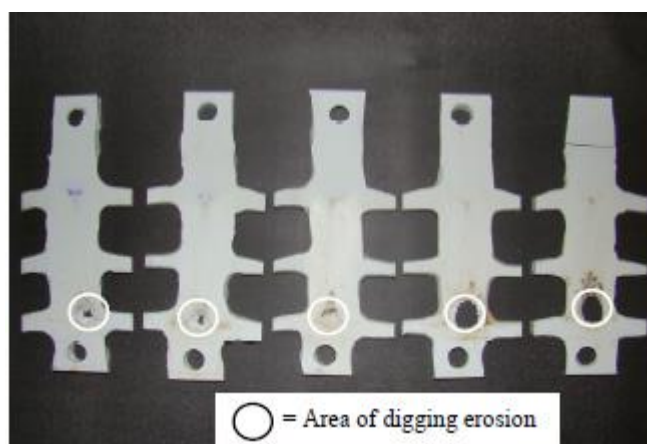
Η δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου (IEC 60587) είναι μια καθιερωμένη δοκιμή υλικού για την αξιολόγηση της αντοχής του μονωτικού υλικού του περιβλήματος ενός συνθετικού μονωτήρα έναντι σχηματισμού επιφανειακών αγωγίων οδεύσεων άνθρακα και διάβρωσης (tracking & erosion) χωρίς καμία εξέταση των επιδράσεων της υδροφοβικότητας του υλικού. Το τεστ χρησιμοποιείται ευρέως για σκοπούς διαλογής κατά τη διάρκεια ανάπτυξης υλικού καθώς και για έλεγχο παρτίδας στα πλαίσια των μέτρων διασφάλισης ποιότητας. Για τον έλεγχο των υλικών, εξετάζονται κυρίως δοκίμια σε πλακοειδές σχήμα [25].

Αφού αφαιρεθούν 3 κυάθια από το μονωτήρα, πλένονται με ισοπροπυλική αλκοόλη και έπειτα ξεπλένονται με απεσταγμένο νερό. Τα δείγματα προσαρμόζονται στη συσκευή κεκλιμένου επιπέδου σε γωνία  $45^\circ \pm 2^\circ$  η οποία τροφοδοτείται με αγωγίμο διάλυμα και εφαρμόζεται τάση στα δοκίμια σύμφωνα με τη μέθοδο 1 ή τη μέθοδο 2 του προτύπου (συνήθως επιλέγεται η μέθοδος 1, καθώς σε αυτήν υπάρχει λιγότερη ανάγκη για συνεχή επιθεώρηση). Σύμφωνα με τη μέθοδο 1 εφαρμόζεται σταθερή τάση 2,5kV ή 3,5kV ή 4,5kV συχνότητας 45Hz με 65Hz στα δοκίμια. Η δοκιμή θεωρείται επιτυχής αν τα δοκίμια αντέξουν την εφαρμοζόμενη τάση για 6 ώρες (Εικόνα 2.7) χωρίς το ρεύμα

διαρροής να ξεπεράσει τα 60mA για 2 δευτερόλεπτα και χωρίς διάτρηση των δειγμάτων ενώ όταν τα δοκίμια δεν ανταπεξέρθουν (Εικόνα 2.8) και δεν ικανοποιηθεί μία από τις ανωτέρω παραμέτρους η δοκιμή θεωρείται ανεπιτυχής [6]



Εικόνα 2.7 Δοκίμια που έχουν αντέξει τα 4.5kV για 6hrs [61]



Εικόνα 2.8. Δοκίμια από SLR ολοχερώς κατεστραμμένα έπειτα από 6hrs [61]

#### 2.2.2.4 Δοκιμή υδροφοβικότητας

Η υδροφοβικότητα είναι μια σημαντική ιδιότητα που μπορεί να οδηγήσει στη μειωμένη συντήρηση και στον περιορισμό του κινδύνου κατάρρευσης λόγω ρύπανσης ή ζημιών από τη γήρανση σε συνθετικό μονωτήρα. Με το πρότυπο IEC 60815-3 [26], εισάγονται διαφορετικοί συντελεστές διόρθωσης της απόστασης ερπυσμού για κάθε διάμετρο του συνθετικού μονωτήρα ανάλογα με τα υδρόφοβα χαρακτηριστικά του υλικού περιβλήματος. Αυτό το έγκυρο πρότυπο απαιτεί τον ποσοτικό προσδιορισμό της κλάσης της υδροφοβικότητας.

Το δυναμικό τεστ πτώσης (dynamic drop test) έχει αναπτυχθεί για τη μέτρηση υδροφοβικότητας στα δοκίμια με εύκολο τρόπο. Η ρύθμιση της δοκιμής είναι παρόμοια με τη δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου IEC 60587 με τη μεγάλη διαφορά να έγκειται στο

ότι το δοκίμιο είναι υπό γωνία κλίσης και όχι κεκλιμένη γωνία (Εικόνα 2.9). Το ιοντικό διάλυμα δεν περιέχει παράγοντα διαβροχής έτσι ώστε τα υδρόφοβα υλικά να μπορούν έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στο αποτέλεσμα της δοκιμής. Τόσο το ποσοστό πτώσης όσο και το ο ρυθμός ροής καθορίζει την ένταση της δοκιμής. Το αποτέλεσμα της δοκιμής είναι ο χρόνος που απαιτείται για να αναπτυχθεί μια συνεχής πορεία στην επιφάνεια του υλικού με συγκεκριμένο ρυθμό ροής. Το τελικό αποτέλεσμα καθορίζεται από την αύξηση του ρεύματος διαρροής όταν σχηματίζεται η συνεχής διαδρομή [25].



Εικόνα 2.9 Προετοιμασία δυναμικού τεστ πτώσης [25]

Στο πρότυπο IEC/TS 62073 [35] περιγράφονται τρεις μέθοδοι ταξινόμησης των συνθετικών μονωτήρων σε κλάσεις υδροφοβικότητας:

α) Μέθοδος μέτρησης επιφανειακής τάσης (surface tension method)

β) contact angle method (Μέθοδος μέτρησης της γωνίας επαφής) και

γ) μέθοδος ψεκασμού (spray method). Οι μέθοδοι διαφέρουν ως προς την ακρίβεια και τον τρόπο διεξαγωγής τους. Οι δύο πρώτες μέθοδοι δεν μπορούν να εφαρμοστούν στο πεδίο αφού απαιτούν εξειδικευμένο εξοπλισμό και συνθήκες εργαστηρίου για τη διεξαγωγή τους [6].

### **2.3 Η έννοια της σκληρότητας και μέθοδοι σκληρομέτρησης**

Σκληρότητα ενός υλικού είναι η αντίσταση που εμφανίζει το υλικό στην μόνιμη διείσδυση ενός ξένου σώματος μέσα σε αυτό, το οποίο υλικό πιέζεται στην επιφάνειά του με κάποια συγκεκριμένη δύναμη και για ορισμένη χρονική διάρκεια. Με μαθηματικούς όρους η σκληρότητα εκφράζεται ως ακολούθως [36].

$$\text{Σκληρότητα} = \frac{\text{Εφαρμοζόμενη δύναμη}}{\text{Επιφάνεια του αποτυπώματος}} \quad \text{ή} \quad H = \frac{P}{A}$$

Οι μέθοδοι μέτρησης της σκληρότητας διείδυσης στηρίζονται στη μέτρηση της αντίστασης που προβάλλει το υλικό στη διείδυση ενός σκληρού, μικρών διαστάσεων, εξαρτήματος (διεισδυτή, indenter), το οποίο πιέζεται με κατάλληλη δύναμη κάθετα στην επιφάνεια του υλικού [37].

Υπάρχουν δυο βασικές κατηγορίες δοκιμών σκληρότητας των υλικών [37]:

(α) Μέτρηση σκληρότητας μέσω διείδυσης – Στατικές μέθοδοι διείδυσης (χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για τη μέτρηση της σκληρότητας των μετάλλων)

(β) Δυναμικές δοκιμές σκληρότητας-Εφαρμόζεται κυρίως σε υψηλές θερμοκρασίες

Μια ακόμη μέθοδος μέτρησης σκληρότητας είναι η δοκιμή χάραξης και χρησιμοποιείται κυρίως στην ορυκτολογία για την μέτρηση της σκληρότητας του διαμαντιού και των πολύτιμων λίθων [36].

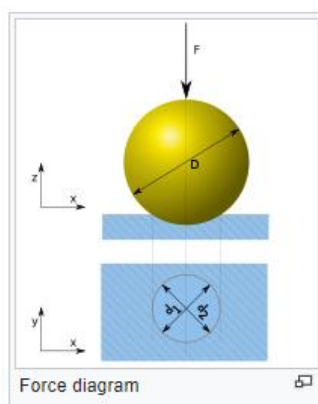
Σύμφωνα με την παραπάνω κατάταξη προκύπτει ότι ανάλογα με τον τρόπο επιβολής του φορτίου (στατικά ή κρουστικά), οι μέθοδοι σκληρομέτρησης διακρίνονται σε στατικές και δυναμικές. Ειδικότερα πρόκειται για την στατική ή κρουστική εφαρμογή ενός φορτίου μέσω ειδικού εξαρτήματος (διεισδυτής / indenter) της μηχανής δοκιμής στην επιφάνεια του προς σκληρομέτρηση αντικειμένου με αποτέλεσμα τη δημιουργία ουλής (depression, indentation). Από τις διαστάσεις της ουλής προσδιορίζεται η σκληρότητα [38].

Ειδικότερα οι στατικές μέθοδοι σκληρομέτρησης (μέθοδοι πίεσης με ειδικά διαμορφωμένο διεισδυτή) καθορίζουν τη σκληρότητα του υλικού βάσει της αντίστασης που εμφανίζει το υλικό στην δύναμη πίεσης. Ειδικότερα στις στατικές δοκιμές ένας κώνος ή μια πυραμίδα διεισδύει στο υλικό. Η σχέση της εφαρμοζόμενης δύναμης ως προς την επιφάνεια ή το βάθος διείδυσης δίνει την σκληρότητα του υλικού. Σε αυτές τις δοκιμές ανήκουν οι τεχνικές Rockwell (1914, H. & S. Rockwell, ΗΠΑ με βάση την ιδέα του Αυστριακού Καθηγητή Paul Ludwik από το 1908), η μέθοδος Brinell (1900, Johan August Brinell, Σουηδία), και η μέθοδος Vickers (1924, Smith & Sandland, Vickers Ltd, Ηνωμένο Βασίλειο) [39].

Κατά τη μέθοδο Brinell μια μικρή σφαίρα διαστάσεων 2.5, 5 ή 10 mm, πιέζεται με σταθερό φορτίο για καθορισμένο χρόνο (10 έως 30 s) πάνω στο δοκίμιο. Μετά το πέρας του πειράματος, μετρώνται οι διαστάσεις του αποτυπώματος και η σκληρότητα υπολογίζεται με έναν προκαθορισμένο τύπο:

$$HBW = 0.102 \cdot \frac{2F}{\pi D \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

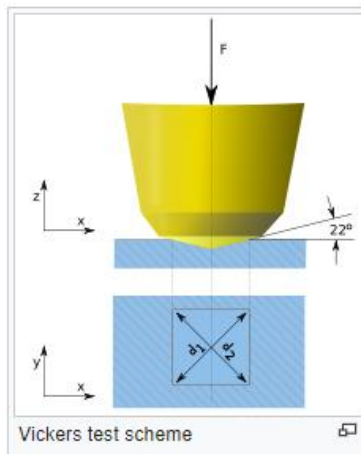
και προκύπτει ένας αριθμός, π.χ. 356HB30 ο οποίος αντιστοιχεί σε λόγο  $P/D^2=30$  και αυξάνει με την αύξηση της σκληρότητας του υλικού [40].



Εικόνα 2.10 Μέθοδος Brinelli [39]

Στη μέθοδο Vickers χρησιμοποιείται ως διεσδυτής αδαμάντινη κανονική τετραγωνική πυραμίδα με γωνία των απέναντι εδρών  $136^\circ$ . Από τη διεσδυση δημιουργείται ένα τετραγωνικό αποτύπωμα με διαγωνίους μήκους  $d_1$  και  $d_2$ . Αν  $d$  είναι η μέση τιμή των δύο διαγωνίων, η επιφάνεια του αποτυπώματος δίνεται από τη σχέση:

$$A = \frac{d^2}{2(\cos 22^\circ)} \quad [22]$$



Εικόνα 2.11 Μέθοδος Vickers [31]

Η δοκιμή συνίσταται από ένα σύνολο σταδίων ως ακολούθως:

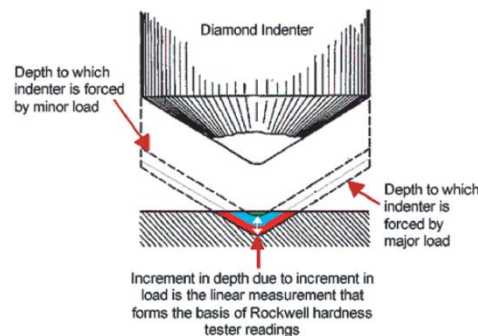
1. Ο διεισδυτής διεισδύει στο δοκίμιο υπό σταθερό φορτίο, το οποίο παραμένει για κάποιο χρονικό διάστημα (10-15 s),
2. Όταν περάσει ο χρόνος εφαρμογής του φορτίου, ο διεισδυτής απομακρύνεται και μετρώνται οι διαστάσεις των διαγωνίων του αποτυπώματος,
3. Καθορίζεται η τιμή σκληρότητας σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο, π.χ.  $HV = 485$  γράφεται 485HV [40].

Τέλος, στην μέθοδο Rockwell, μετριέται το βάθος διείσδυσης του διεισδυτή με μονάδα μέτρησης 2  $\mu\text{m}$  μέσα από τα ακόλουθα βήματα [30]

1. Ο διεισδυτής τοποθετείται χωρίς φορτίο στην επιφάνεια του δοκιμίου
2. Ένα μικρό φορτίο (10kgf) εφαρμόζεται για να ξεπεραστούν οι επιφανειακές ανωμαλίες και καθορίζεται ένα επίπεδο αναφοράς
3. Εφαρμόζεται το κύριο φορτίο (150kgf) για 5 s και έπειτα απομακρύνεται
4. Μετριέται το τελικό βάθος του αποτυπώματος από το
5. επίπεδο αναφοράς και προκύπτει ο αριθμός HRC, π.χ. 44HRC

Υπάρχουν δύο παραλλαγές της μεθόδου ανάλογα με τον εισβολέα:

- Μέθοδος Rockwell C (HRC) με αδαμάντινο κώνο γωνίας κορυφής 1200
- Μέθοδος Rockwell B (HRB) με χαλύβδινη σφαίρα διαμέτρου 1/16



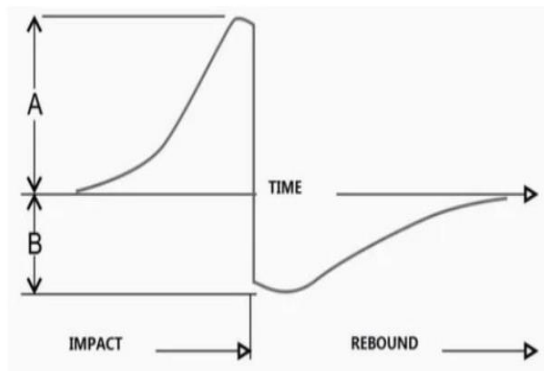
Εικόνα 2.12 Μέθοδος Rockwell [31]

Αντίθετα οι δυναμικές μέθοδοι σκληρομέτρησης συσχετίζουν τη σκληρότητα με την ελαστική απόκρισή του. Η μέθοδος Shore η οποία θα περιγραφεί παρακάτω, χρησιμοποιείται για ελαστικά (rubber) πλαστικά (plastics) προκειμένου να καθορισθεί τη τιμή της σκληρότητας του υλικού [31].

### 2.3.1 Η μέθοδος δυναμικής σκληρομέτρησης πολυμερών Shore

Η σκληρότητα ενός υλικού όπως προαναφέρθηκε μπορεί να γίνει όχι μόνο με τη χρήση στατικών μεθόδων σκληρομέτρησης αλλά και δυναμικών με κριτήριο την ελαστική επαναφορά ενός υλικού [59]. Οι μέθοδοι με διεισδυτή καθορίζουν τη σκληρότητα βάσει της πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού, ενώ οι δυναμικές μέθοδοι καταπόνησης συσχετίζουν τη σκληρότητα με την ελαστική απόκρισή του. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι δυναμικής σκληρομέτρησης είναι η μέθοδος Shore και η μέθοδος Leeb (“Equotip”) στις οποίες ένας εισβολέας προσκρούει στο προς εξέταση υλικό. Μετريέται το ύψος αναπήδησης της σφαίρας και καθορίζεται η ενέργεια που χάθηκε κατά την πρόσκρουση [41].

Ο εφευρέτης της μεθόδου Leeb, ο D. Leeb, όρισε τη "δική του" αξία σκληρότητας, την τιμή σκληρότητας Leeb. Η τιμή σκληρότητας Leeb, HL, υπολογίζεται από την αναλογία της ταχύτητας πρόσκρουσης και αναπήδησης και είναι ίση με τον λόγο της ταχύτητας αναπήδησης ( $v_R$ ) προς την ταχύτητα πρόσκρουσης ( $v_I$ ) πολλαπλασιασμένη με 1000. Τέλος, ο τρόπος υπολογισμού των ταχυτήτων δίνει την δυνατότητα στο να πάρουμε μετρήσεις σε οποιαδήποτε κατεύθυνση χωρίς να χρειάζεται να λάβουμε υπόψιν μας κάποιον συντελεστή διόρθωσης της δύναμης της βαρύτητας.[42]



Εικόνα 2.13 Γράφημα Απεικόνισης της μεθόδου Leeb [60]

Η μέθοδος Shore πήρε το όνομά της από τον εφευρέτη της Albert Ferdinand Shore, και η οποία προσφέρει διαφορετικές κλίμακες για τη μέτρηση της σταθερότητας διαφορετικών υλικών. (Ο Shore γεννήθηκε το 1876 και έζησε μέχρι το 1936, δημιουργώντας την κλίμακα «Shore» τη δεκαετία του 1920)[43].

Με τη μέθοδο Shore καθορίζεται η σκληρότητα από το ύψος αναπήδησεως μικρής σφύρας διαμέτρου 6.5 mm από ύψος 20 mm, η οποία καταλήγει σε μικρή αδαμάντινη αιχμή και πέφτει ελεύθερα στο προς εξέταση υλικό. Το ύψος αναπήδησης μετριέται σε κλίμακα 146 υποδιαίρεσεων. Επειδή το αποτύπωμα είναι πολύ μικρό, χρησιμοποιείται σε έτοιμα κομμάτια, αλλά τα αποτελέσματα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος του δοκιμίου και το είδος στήριξης. Επομένως το δοκίμιο πρέπει να στηρίζεται κατάλληλα, ώστε να μην επηρεάζεται η μέτρηση[44].

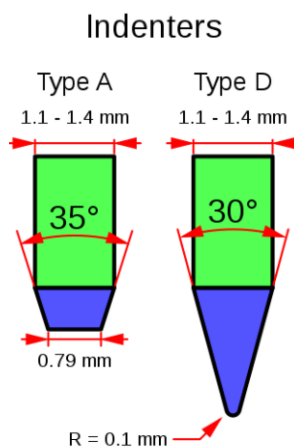
Υπάρχουν περίπου 15 διαφορετικές κλίμακες, ανάλογα με την προβλεπόμενη χρήση τους. Κάθε κλίμακα θα έχει ως αποτέλεσμα μια τιμή από 0 και 100, με τον μεγαλύτερο αριθμό που σχετίζεται με την αυξημένη σκληρότητα. Ωστόσο, υπάρχουν διαφορές μεταξύ του Rockwell και του Shore Durometer. Ενώ και τα δύο μετρούν την αντίσταση των πλαστικών στην εσοχή - όσο υψηλότερος ο αριθμός σημαίνει μεγαλύτερη σκληρότητα του υλικού - η σκληρότητα Shore χρησιμοποιεί είτε την κλίμακα Shore A είτε Shore D.

Οι δύο πλέον διαδεδομένες κλίμακες / τύποι σκληρόμετρων είναι, δηλαδή σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D2240 [44], οι A και D κλίμακες. Τα σκληρόμετρα μέτρησης με βάση την κλίμακα A είναι κατάλληλα για μετρήσεις μαλακών πλαστικών υλικών ενώ τα σκληρόμετρα τύπου D είναι κατάλληλα για σκληρομετρήσεις



σκληρότερων πλαστικών. Η βασική διαφορά τους έγκειται στην μορφή του διεισδυτή ίσως επίσης και στην πίεση που ασκεί το ελατήριο [9].

Ειδικότερα στην κλίμακα Shore A ο διεισδυτής είναι κώνος κώνος  $35^\circ$  διαμέτρου 0.79 mm ενώ στην κλίμακα Shore D ο διεισδυτής είναι κώνος σφαιρικής απόληξης  $30^\circ$  και ακτίνας 0,1mm (Εικόνα 2.13). Η διαφορά αυτή στους διεισδυτές αλλά και στις πιέσεις των ελατηρίων προκαλεί και διαφορετικές δυνάμεις διείσδυσης και συγκεκριμένα 8,064N για την κλίμακα Shore A και 44,64N για την κλίμακα Shore D [9].



Εικόνα 2.14 Διαστάσεις διεισδυτών τύπου A και D [44]

Η μέθοδος Rockwell, εν τω μεταξύ, χρησιμοποιείται για «σκληρότερα» πλαστικά:

- Πολυανθρακικά τα οποία είναι μια ομάδα θερμοπλαστικών πολυμερών που περιέχουν ανθρακικές ομάδες στις χημικές τους δομές
- Νάιλον μια οικογένεια συνθετικών πολυμερών γνωστών γενικά ως αλειφατικών πολυαμιδίων
- Ακετάλη ή πολυοξυμεθυλένιο, ένα θερμοπλαστικό μηχανικής που χρησιμοποιείται σε μέρη ακριβείας που απαιτούν υψηλή ακαμψία, χαμηλή τριβή και εξαιρετική σταθερότητα διαστάσεων
- Πολυστυρένιο το οποίο είναι αρωματικός υδρογονάνθρακας ο οποίος παράγεται από το μονομερές στυρένιο [31]

Μια τυποποιημένη δοκιμή που χρησιμοποιείται σε ολόκληρο το πεδίο της βιομηχανίας, η τεχνική σκληρότητας Shore D μετρά το βάθος της διείσδυσης μιας εσοχής, χρησιμοποιώντας γενικά τις μεθόδους δοκιμής ASTM D2240 [44] και ISO

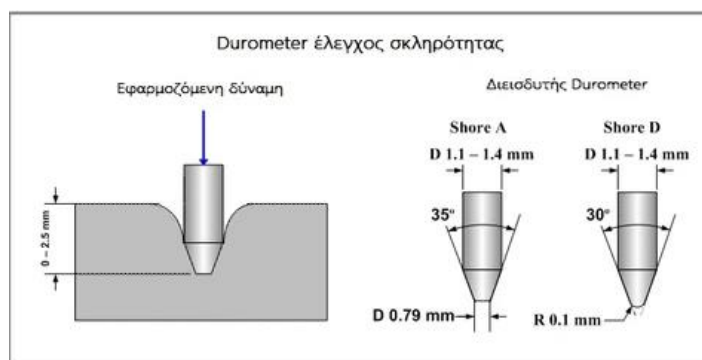
868[45] μετρήσεις μεταξύ 0 και 100. Η μέθοδος σκληρότητας Shore D χρησιμοποιείται όταν ένα υλικό είναι πολύ μαλακό για να μετρηθεί από το τεστ Rockwell. Η δοκιμή Shore χρησιμοποιείται κυρίως για μαλακά υλικά, όπως καουτσούκ ή θερμοπλαστικά ελαστομερή (TPE). Πολυολεφίνες, φθοροπολυμερή και βινύλιο εμπίπτουν επίσης σε αυτήν την κατηγορία[43].

Η κλίμακα Shore A ειδικότερα, χρησιμοποιείται για τη δοκιμή μαλακών ελαστομερών (ελαστικών) και άλλων μαλακών πολυμερών. Η σκληρότητα των σκληρών ελαστομερών και των περισσότερων άλλων πολυμερών υλικών (Θερμοπλαστικά, Θερμοσυστήματα) μετρείται με την κλίμακα Shore D. Η σκληρότητα Shore δοκιμάζεται με ένα όργανο που ονομάζεται ντουρόμετρο (Durometer). [12].

Η σκληρομέτρηση κατά Shore χρησιμοποιεί:

- Έναν σκληρό διεισδυτή (Indentor),
- Ένα βαθμονομημένο ελατήριο (Calibrated Spring),
- Έναν ενδείκτη βάθους, (Graduated Dial with Indicating hand)
- Μια επίπεδη επιφάνεια πίεσης (Presser Foot)

Η μετρούμενη σκληρότητα καθορίζεται από το βάθος διείσδυσης της εσοχής κάτω από το φορτίο. Η τιμή σκληρότητας Shore μπορεί να κυμαίνεται από 0 έως 100. Η μέγιστη διείσδυση για κάθε κλίμακα είναι 0,097-0,1 ίντσες (2,5-2,54 mm). Αυτή η τιμή αντιστοιχεί στην ελάχιστη σκληρότητα Shore: 0. Η μέγιστη τιμή σκληρότητας 100 αντιστοιχεί σε μηδενική διείσδυση [46].

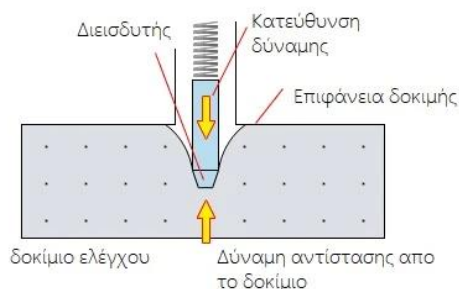


Εικόνα 2.15 Οι διεισδυτές για τα σκληρόμετρα κατά Shore A και Shore D [46]

Η σκληρότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη με τη διείσδυση και εξαρτάται από την ελαστικότητα και την ιξωδο-ελαστική συμπεριφορά του υλικού. Η γεωμετρία του

διεισδυτή και η εφαρμοζόμενη δύναμη επηρεάζουν τις μετρήσεις έτσι ώστε να μην υπάρχει μια απλή σχέση μεταξύ των μετρήσεων που λαμβάνονται με ένα τύπο σκληρομέτρου και εκείνων που λαμβάνονται με άλλο τύπο σκληρομέτρου ή άλλα όργανα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση σκληρότητας [47].

Όσον αφορά ειδικότερα τον τρόπο λειτουργίας του σκληρομέτρου Shore, η αρχή η οποία χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της σκληρότητας βασίζεται στη μέτρηση της δύναμης αντίστασης της διείσδυσης ενός πείρου στο υλικό δοκιμής υπό ένα γνωστό φορτίο σε ελατήριο. Η τιμή διείσδυσης (μέγιστο 2,5 mm) μετατρέπεται σε ανάγνωση σκληρότητας σε κλίμακα με 100 μονάδες. Η μετρηθείσα σκληρότητα καθορίζεται από το βάθος διείσδυσης του διεισδυτή υπό ένα φορτίο. Με βάση το πρότυπο ASTM D 2240 [44], οι τιμές κάτω των 10 και πάνω από 90 δεν είναι αξιόπιστες συνεπώς είναι σημαντικό να επιλέγεται η κλίμακα η οποία θα παρέχει μετρήσεις μεταξύ 10-90 μονάδων [33]



Εικόνα 2.16. Αρχή λειτουργίας σκληρομέτρου με τη μέθοδο Shore [31]

Τέλος θα πρέπει να επισημανθεί (βλ. απεικόνιση 2.14) ότι εκτός από τις μεθόδους σκληρομέτρησης Shore A και Shore D υπάρχουν και οι μέθοδοι Shore C για μεσαίο-σκληρό καουτσούκ, θερμοπλαστικά ελαστομερή, μεσαία-σκληρά πλαστικά και θερμοπλαστικά καθώς και η μέθοδος Shore O για μετρήσεις σκληρότητας σε εξαιρετικά μαλακό ελαστικό, θερμοπλαστικά ελαστομερή, σφουγγάρι, εξαιρετικά μαλακά πλαστικά και θερμοπλαστικά, αφρούς, υφασμάτινες περιελίξεις χαμηλής αραίωσης και ανθρώπινους και ζωικούς ιστούς [43].

<b>ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗΣ SHORE</b>	<b>ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ</b>
A	Μαλακό βουλκανισμένο καουτσούκ, νιτρίλια, θερμοπλαστικά ελαστομερή, εύκαμπτα, πολυκρυσταλικά, κερί και δέρματα
B	Μεσαίο σκληρό καουτσούκ, θερμοπλαστικά ελαστομερή, μεσαία σκληρά πλαστικά και θερμοπλαστικά
C	Σκληρό καουτσούκ, θερμοπλαστικά ελαστομερή, σκληρότερα πλαστικά και άκαμπτα θερμοπλαστικά
D	Εξαιρετικά μαλακό ελαστικό, θερμοπλαστικά ελαστομερή, σφουγγάρι, εξαιρετικά μαλακά πλαστικά και θερμοπλαστικά, αφροί, υφασμάτινες περιελίξεις χαμηλής αραίωσης, ανθρώπινοι και ζωικοί ιστοί

Πίνακας 2.1 Μέθοδοι σκληρομέτρησης ανά εξεταζόμενο υλικό [46]

#### 2.4 Δοκιμές σκληρότητας σε συνθετικά υλικά

Οι δοκιμές σκληρότητας με τη μέθοδο Shore A, σε συνθετικά υλικά, εφαρμόζονται σήμερα όλο και πιο συχνά.. Δεν έχουν γίνει αρκετές έρευνες ειδικά για δοκιμές σκληρότητας σε μονωτήρες, ωστόσο οι έρευνες στις οποίες έχουν πραγματοποιηθεί δοκιμές σκληρότητας σε πολυμερή υλικά, μπορούν να εφαρμοστούν και στους συνθετικούς μονωτήρες προκειμένου να προβλέψουν την συμπεριφορά τους καθώς και την διάρκεια ζωής στους μετά την έκθεση σε υψηλή τάση [48].

Αρκετές έρευνες έχουν προβεί στην σύγκριση σκληρότητας πολυμερών υλικών τα οποία έχουν παραχθεί με διαφορετικές διαδικασίες. Για παράδειγμα σε μια σχετική έρευνά τους οι Vian & Denton [49] δοκίμασαν την σκληρότητα δειγμάτων τα οποία ήταν κατασκευασμένα από θερμοπλαστικά, συμπεριλαμβανομένων της πολυστερίνης (PS), πολυαιθυλενίου χαμηλής πυκνότητας (LDPE), τριπολυμερούς ακρυλονιτριλίου-βουταδιενίου-στυρενίου και βιοπλαστικού πολυγαλακτικού οξέως (PLA). Όλα τα δείγματα υποβλήθηκαν σε δοκιμές σκληρότητας Shore A και Shore D. Όλα τα αποτελέσματα της δοκιμής καταγράφηκαν προκειμένου να συγκριθούν οι τιμές σκληρότητας που αντιστοιχούν σε κάθε διεργασία μέτρησης σκληρότητας για τα διάφορα δείγματα πολυμερών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι παρατηρήθηκαν φυσαλίδες στα δείγματα από πολυστερίνη (PS) και στα δείγματα από στυρόλιο βουταδιενίου ακρυλονιτρίλιου (ABS) που δεν διαθέτουν επίπεδες επιφάνειες. Με βάση τα πορίσματα αυτά οι ερευνητές, αναρωτήθηκαν σχετικά με το εάν οι φυσαλίδες και η αντίστοιχη μείωση της πυκνότητας στα υλικά αυτά θα μπορούσε να προκαλέσει σημαντική διαφορά στις τιμές σκληρότητάς τους και κυρίως αν τα υλικά αυτά μπορούν υπ' αυτή την έννοια να ανταποκριθούν σε συνθήκες υψηλής καταπόνησης και στρες σε σχέση με άλλα υλικά τα οποία παρουσιάζουν βελτιωμένες βαθμολογίες στο Shore A test [49].

Σε μια σχετική επίσης έρευνά τους οι Ghosh & Khastgir [50] ερεύνησαν την σκληρότητα σε σύνθετους πολυμερείς μονωτήρες. Οι σύνθετοι πολυμερείς μονωτήρες είναι παρόμοιοι με τους μονωτήρες στήριξης, ως προς το σχήμα, αλλά διαφέρουν ως προς τα υλικά κατασκευής.

Οι πολυμερείς μονωτήρες αποτελούνται από ένα πυρήνα ρητίνης ενισχυμένο με υαλώδεις ίνες (glass fibre), ο οποίος παρέχει μηχανική αντοχή, ενώ ταυτόχρονα ανθίσταται και στην ηλεκτρική καταπόνηση, ένα ελαστομερές περίβλημα (sheath/housing) για να προστατεύει τον πυρήνα από τις καιρικές συνθήκες και ελαστομερείς δίσκους (sheds), οι οποίοι αποσκοπούν στην αύξηση του μήκους ερπυσμού, ώστε να ανθίστανται ο μονωτήρας στις εντάσεις που επικρατούν στο σύστημα [3].

Όπως αναφέρουν και οι Ghosh & Khastgir [50] οι σύνθετοι πολυμερείς μονωτήρες αποτελούμενοι από μονωτές πολυμερούς ενισχυμένου με πυρήνα ρητίνης καλυμμένο με περίβλημα πολυδιμεθυλοσιλοξάνης (PDMS) η οποία ανήκει σε μια ομάδα πολυμερών ενώσεων οργανοπυριτίου που συνήθως αναφέρονται ως σιλικόνες αντικαθιστούν πλέον όλο και πιο συχνά συμβατικούς κεραμικούς μονωτήρες, ειδικά για γραμμές μεταφοράς υψηλής ισχύος υπαίθρου λόγω ορισμένων ειδικών πλεονεκτημάτων.

Σε αντίθεση με τα κεραμικά, τα πολυμερή έχουν σχετικά μικρότερη διάρκεια ζωής. Οι εξωτερικοί μονωτήρες αντιμετωπίζουν διαφορετικές ηλεκτρικές, μηχανικές, χημικές και θερμικές καταπονήσεις κατά τη διάρκεια της ζωής τους. Η μακροπρόθεσμη απόδοση αυτών των μονωτήρων και η εκτίμηση της διάρκειας ζωής τους είναι ένα σημαντικό ζήτημα, αλλά παράλληλα, είναι περίπλοκο και χρονοβόρο. Ο στόχος της έρευνάς τους, ήταν να ελέγξουν το ποσοστό υποβάθμισης κατά τη διάρκεια της ζωής

των συγκεκριμένων μονωτήρων και να βρουν την κατά προσέγγιση διάρκεια ζωής τους [50].

Έτσι οι ερευνητές πραγματοποίησαν δοκιμές σε διάφορους τύπους μονωτήρων κεραμικών και συνθετικών, με διαφορετικές ηλικίες και μετρήθηκαν οι αλλαγές που παρουσίασαν στις μηχανικές τους ιδιότητες αλλά και ως προς τις ηλεκτρικές ιδιότητες και την υδροφοβικότητα του PDMS έναντι του χρόνου γήρανσης. Η πρόβλεψη της διάρκειας ζωής των μονωτήρων είναι χρήσιμη για την αντικατάσταση των παλαιών μονωτήρων για την αποφυγή διακοπής στη μετάδοση ισχύος. Ειδικότερα για την μέτρηση της σκληρότητας των διαφόρων δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε ντουρόμετρο τύπου A (Shore Instruments και MFG Co, INC, USA, CV-71200 CONVELOADER)

Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι το υλικό περιβλήματος πολυμερούς σιλικόνης εμφάνισε κατά την διαδικασία του εφελκυσμού μείωση στην επιμήκυνση κατά τη θραύση και αύξηση της σκληρότητας κατά τη διάρκεια της γήρανσης.

Ειδικότερα, σύμφωνα με τους ερευνητές, σε γενικές γραμμές, όταν τα πολυμερή υπόκεινται σε γήρανση, δύο τύποι χημικών αντιδράσεων λαμβάνουν χώρα στο σύστημα: η πρώτη είναι η διάσπαση αλυσίδας, δηλαδή, ο κατακερματισμός μακρών πολυμερών αλυσίδων σε σύντομα θραύσματα και η δεύτερη είναι η διασταύρωση των κατακερματισμένων αλυσίδων μέσω μακροαδικού συνδυασμού ακολουθούμενος από ανασυνδυασμό αυτών των μακροαδικών, οδηγώντας στον σχηματισμό τρισδιάστατων δικτύων με αύξηση της πυκνότητας των σταυροδεσμών. Εάν υπερισχύει η πρώτη διαδικασία, το αποτέλεσμα θα μαλακώσει το πολυμερές προϊόν κατά τη γήρανση. Εάν επικρατήσει η δεύτερη διαδικασία, το αποτέλεσμα θα είναι η σκλήρυνση του πολυμερούς προϊόντος με την αύξηση του χρόνου γήρανσης [50].

Στην πραγματικότητα πάντως η διαδικασία φυσικής γήρανσης και μείωσης της σκληρότητας των μονωτήρων κατά τη διάρκεια της ζωής τους, είναι μια πολύπλοκη σειρά αντιδράσεων. Εκτός από τη χημική αποικοδόμηση του PDMS, η ζημιά στην επιφάνεια του καλύμματος / του περιβλήματος (ρωγμές και διάβρωση) από αμοθύελλα, όξινη βροχή και ηλεκτρική εκφόρτιση είναι επίσης πιθανό φαινόμενο [50].

Σε μια πολύ πρόσφατη επίσης μελέτη των Kamarudin et al., [61] οι ερευνητές εξέτασαν τις ιδιότητες σκληρότητας και απορρόφησης νερού συνθετικών υλικών από

καουτσούκ σιλικόνης για εφαρμογές σε μονωτήρες υψηλής τάσης. Ειδικότερα στην έρευνά τους εξέτασαν τις φυσικές ιδιότητες του καουτσούκ σιλικόνης στο οποίο είχαν προσθέσει πληρωτικά όπως ανθρακικό ασβέστιο, διοξείδιο του πυριτίου και βαλστονίτη ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  και  $\text{CaSiO}_3$ ) για εφαρμογές μονωτήρων υψηλής τάσης. Τα φυσικά χαρακτηριστικά αναλύθηκαν μέσω της δοκιμής σκληρότητας και απορρόφησης νερού.

Σε σχέση με την σκληρότητα χρησιμοποιήθηκε το ντουρόμετρο SHORE-A σύμφωνα με το πρότυπο ASTM 2240 [44] το οποίο χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της σκληρότητας ενός ελαστικού δείγματος με τη χρήση μιας σειράς δοκιμών που πραγματοποιούνται με ένα σκληρόμετρο. Η σκληρότητα μετράται όταν ασκείται δύναμη στο δείγμα με εσοχή υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Τα δείγματα καταρχάς ρυθμίστηκαν σε τυπική εργαστηριακή ελεγχόμενη θερμοκρασία  $25\text{ }^\circ\text{C}$ , για τουλάχιστον 3 ώρες πριν από τη δοκιμή σκληρότητας.

Οι μετρήσεις λήφθηκαν σε σταθερά χρονικά διαστήματα και συγκεκριμένα το επόμενο δευτερόλεπτο αφού το πόδι πίεσης είχε σταθερή επαφή με το δείγμα. Πέντε μετρήσεις σε διαφορετικές τοποθεσίες λήφθηκαν για το κάθε δείγμα και η μέση τιμή προσδιορίστηκε ως τελική μέτρηση. Το βάθος της εσοχής μετρήθηκε ώστε να προκύψει το μέτρο σκληρότητας δείγματος. Οι τιμές μέτρησης ήταν με βάση την κλίμακα 100 σημείων (ακρίβεια  $\pm 1,00$  βαθμός) [51].

Ο σκοπός της δοκιμής σκληρότητας είναι να καταδείξει το αποτέλεσμα της ελαστικής σταυροσύνδεσης εντός της μήτρας του καουτσούκ SiR με την παρουσία διαφορετικών τύπων πληρωτικών ορυκτών πριν και μετά την έκθεση σε υψηλή τάση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα συνθετικά υλικά εμφάνισαν υψηλότερες τιμές σκληρότητας σε σύγκριση με το δείγμα ελέγχου και ότι το δείγμα ελέγχου χωρίς πληρωτικά είχε την χαμηλότερη απόδοση σκληρότητας σε σύγκριση με τα εντελώς γεμάτα βουλκανισμένα σύνθετα βασισμένα στο SiR [51].

Μία ακόμη δοκιμή με σκοπό να γίνει σύγκριση της συμπεριφοράς σκληρότητας των υλικών πριν και μετά την έκθεση σε υψηλή τάση ήταν η αξιολόγηση των επιδράσεων της εφαρμογής υψηλής τάσης στην δομή μακρομορίων του SiR, και ο ρόλος του προστιθέμενου ορυκτού πληρωτικού στη διατήρηση αυτών των φυσικών ιδιοτήτων. Συγκρίνοντας λοιπόν και τις δύο τιμές σκληρότητας πριν και μετά την έκθεση των υλικών σε υψηλή τάση, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι η τιμή

σκληρότητας μετά από την έκθεση σε υψηλή τάση ήταν υψηλότερη από ό, τι πριν από τη δοκιμή, για κάθε αντίστοιχο φορτίο πλήρωσης. Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι στα συνθετικά υλικά οι τιμές σκληρότητας βρέθηκαν βελτιωμένες μετά την έκθεσή τους σε υψηλή τάση [51].

## 2.5 Μέτρηση σκληρότητας κατά το διεθνές πρότυπο ISO-48-4

Μέτρηση σκληρότητας διείσδυσης με την μέθοδο του σκληρομέτρου (Σκληρότητα κατά Shore)

### Εισαγωγή

Το 2017, αποφασίστηκε να ομαδοποιηθούν τα πρότυπα για τη σκληρότητα και, στη συνέχεια, συμφωνήθηκε ότι αυτά θα ομαδοποιηθούν κάτω από τον αριθμό ISO 48. Τα νέα πρότυπα αναφέρονται παρακάτω:

Ισχύων Πρότυπο	Σε αντικατάσταση
ISO 48-1	ISO 18517
ISO 48-2	ISO 48
ISO 48-3	ISO 27588
ISO 48-4	ISO 7619-1
ISO 48-5	ISO 7619-2
ISO 48-6	ISO 7267-1
ISO 48-7	ISO 7267-2
ISO 48-8	ISO 7267-3
ISO 48-9	ISO 18898

Πίνακας 2.2 Ομαδοποίηση προτύπων σκληρότητας [46]

Η σκληρότητα του ελαστομερούς (Shore hardness) μετράται από ένα σκληρόμετρο ή έναν μετρητή τσέπης (IRHD-International Rubber Hardness Degrees), και προσδιορίζεται από την ανταπόκριση του σε μια εφαρμοσμένη δύναμη εισχώρησης. Η μέτρηση είναι περίπλοκη και εξαρτάται από:

- α) τον συντελεστή ελαστικότητας ·
- β) τις ιξωδοελαστικές ιδιότητες του ελαστομερούς ·
- γ) το πάχος του δοκιμίου ·



δ) τη γεωμετρία του διεισδυτή

ε) τη πίεση που ασκείται

στ) τον ρυθμό αύξησης της πίεσης

ζ) το διάστημα που μεσολαβεί για την καταγραφή της σκληρότητας

Λόγω αυτών των παραγόντων, δεν ενδύκνεται να συσχετίζονται τα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας durometer (Shore hardness) απευθείας στις τιμές IRHD, αν και έχουν καθιερωθεί συσχετισμοί για ορισμένα μεμονωμένα ελαστομερή και ενώσεις.

Τα σκληρόμετρα ήταν αρχικά φορητά όργανα χειρός που έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αξιόπιστα για την πραγματοποίηση μετρήσεων σε προϊόντα. Μέχρι τώρα πολλά εργαστήρια τα χρησιμοποιούν επίσης σε πάγκο εναποθέτοντας πάνω τους συγκεκριμένο βάρος στο σημείο πίεσης για να επιτύχουν μεγαλύτερη ακρίβεια[46].

### **Βουλκανισμένα ή θερμοπλαστικά ελαστομερή υλικά-Ορισμός της σκληρότητας**

#### Πεδίο εφαρμογής

Καθορίζεται η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της σκληρότητας διείσδυσης (σκληρότητα κατά Shore) από βουλκανισμένα ή θερμοπλαστικά υλικά χρησιμοποιώντας σκληρόμετρα με τις παρακάτω κλίμακες:

-η κλίμακα A για ελαστομερή σε εύρος κανονικής σκληρότητας

-η κλίμακα D για ελαστομερή σε εύρος υψηλής σκληρότητας

-η κλίμακα AO για ελαστομερή στην περιοχή χαμηλής σκληρότητας και για κυτταρικά ελαστομερή

-η κλίμακα AM για λεπτό δοκίμια ελαστομερών στο εύρος κανονικής σκληρότητας [46].

## Σκληρόμετρα τύπου A, D, AO

### Αρχή

Ένας διεισδυτής συγκεκριμένων διαστάσεων εισχωρεί σε ένα δοκίμιο υπό συγκεκριμένο φορτίο και το βάθος της εν λόγω εσοχής μετράται. Αυτή η εισχώρηση μετατρέπεται σε τιμές σκληρότητας υπό συγκεκριμένες σχέσεις μετατροπής.

### Επιλογή σκληρομέτρου

Όταν χρησιμοποιούμε σκληρόμετρα η κλίμακα πρέπει να επιλέγεται ως ακολούθως:

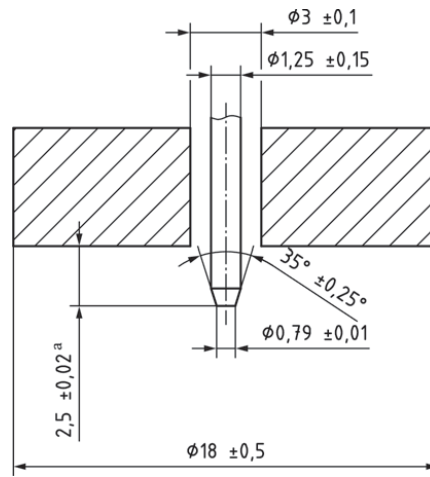
- για τιμές μικρότερες από 20 με σκληρόμετρο τύπου D: τύπος A
- για τιμές μικρότερες από 20 με σκληρόμετρο τύπου A: τύπος AO
- για τιμές μεγαλύτερες από 90 με σκληρόμετρο τύπου A: τύπος D
- για λεπτά δοκίμια (λεπτότερα των δχιλιοστών) : τύπος AM

### Διεισδυτής

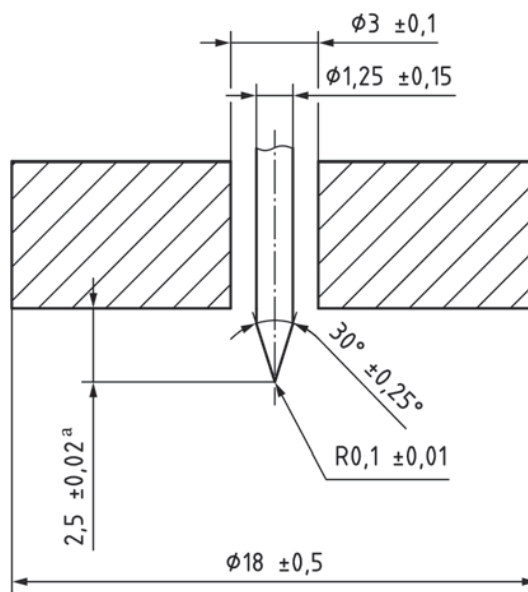
Ο διεισδυτής για τους τύπους A και D πρέπει να έχει διάμετρο  $18 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$  και κεντρική οπή διαμέτρου  $3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ . Για τον τύπο AO, το πόδι πίεσης πρέπει να έχει ελάχιστη επιφάνεια  $500 \text{ mm}^2$  με κεντρική οπή διαμέτρου  $5,4 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ . Οι ανοχές στη διάσταση της κεντρικής οπής και του η απαίτηση για το μέγεθος του ποδιού πίεσης ισχύει μόνο για όργανα που χρησιμοποιούνται σε σταθερή βάση [46].

### Διεισδυτής

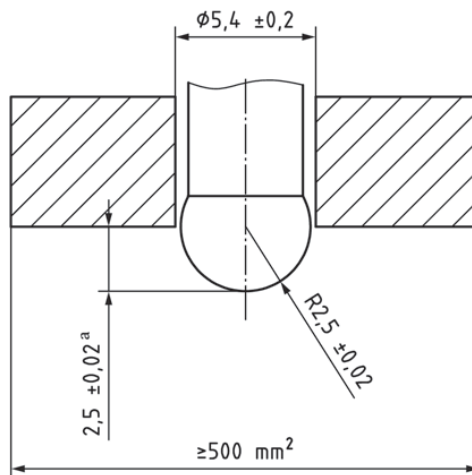
Ο διεισδυτής πρέπει να είναι διαμορφωμένος από μια ράβδο επισκληρυμένου χάλυβα διαμέτρου  $1,25 \text{ mm} \pm 0,15 \text{ mm}$  στο σχήμα και διαστάσεις που φαίνονται στην Εικόνα 2.16 για τα σκληρόμετρα τύπου A και την Εικόνα 2.17 για τα σκληρόμετρα τύπου D. Τα σκληρόμετρα τύπου AO πρέπει να έχουν στρογγυλό διεισδυτή με ακτίνα  $2,5 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$  σύμφωνα με την Εικόνα 2.17



Εικόνα 2.17-Δεισδυτής για σκληρόμετρα τύπου A (διαστάσεις σε mm) [46]



Εικόνα 2.18-Δεισδυτής για σκληρόμετρα τύπου D (διαστάσεις σε mm) [46]



Εικόνα 2.19-Διεσδυτής για σκληρόμετρα τύπου ΑΟ (διαστάσεις σε mm) [46]

### Ενδειγμένη συσκευή

Αυτή είναι μια συσκευή που επιτρέπει την έκταση της προεξοχής του σημείου της διεσδυσης πέρα από την όψη του πόδιου πίεσης ώστε να επιτρέπεται η ανάγνωση. Πρέπει να βαθμονομείται απευθείας σε όρους μονάδων που κυμαίνονται από 0 για την μέγιστη προεξοχή  $2,50 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$  έως 100 για μηδενική προεξοχή που λαμβάνεται με την τοποθέτηση του ποδιού πίεσης και του διεσδυτή σε σταθερή επαφή με κατάλληλη ευθεία σκληρή επιφάνεια (πχ γυαλί).

### Βαθμονομημένο ελατήριο

Αυτό χρησιμοποιείται για να εφαρμόσει μια δύναμη,  $F$ , εκφρασμένη σε millinewtons, στον διεσδυτή σύμφωνα με έναν από τους ακόλουθους τύπους:

Για σκληρόμετρα τύπου Α:

$F = 550 + 75H_A$  όπου  $H_A$  είναι η σκληρότητα που λαμβάνουμε από την ανάγνωση του σκληρόμετρου τύπου Α.

Για σκληρόμετρα τύπου D:

$F = 445 H_D$  όπου  $H_D$  είναι η σκληρότητα που λαμβάνουμε από την ανάγνωση του σκληρόμετρου τύπου D.

Για σκληρόμετρα τύπου ΑΟ:

$F = 550 + 75H_{AO}$  όπου  $H_{AO}$  είναι η σκληρότητα που λαμβάνουμε από την ανάγνωση του σκληρόμετρου τύπου AO.

#### Αυτόματη συσκευή με χρονοδιακόπτη (προαιρετικά)

Ο χρονοδιακόπτης ενεργοποιείται αυτόματα όταν το πόδι πίεσης είναι σε επαφή με το δοκίμιο και υποδεικνύει το τέλος του χρόνου δοκιμής ή κλειδώνει την τιμή δοκιμής κατά την ολοκλήρωσή της. Η χρήση μιας συσκευής με χρονοδιακόπτη για τον χρόνο δοκιμής βελτιώνει την ακρίβεια. Όταν το όργανο χρησιμοποιείται σε βάση, η χρονική ανοχή πρέπει να είναι  $\pm 0,3$  s.

### **Σκληρόμετρο τύπου AM**

#### Πόδι πίεσης

Το πόδι πίεσης πρέπει να έχει διάμετρο  $9 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$  και κεντρική οπή διαμέτρου  $1,19 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ .

#### Διεισδυτής

Ο διεισδυτής πρέπει να είναι διαμορφωμένος από μια ράβδο σκληρυμένου χάλυβα διαμέτρου  $0,79 \text{ mm} \pm 0,025 \text{ mm}$  στο σχήμα και διαστάσεις που φαίνονται στο σχήμα 4.

#### Ενδεδειγμένη συσκευή

Αυτή είναι μια συσκευή που επιτρέπει την έκταση της προεξοχής του σημείου της διείσδυσης πέρα από την όψη του πώδιου πίεσης ώστε να επιτρέπεται η ανάγνωση. Πρέπει να βαθμονομείται απευθείας σε όρους μονάδων που κυμαίνονται από 0 για την μέγιστη προεξοχή  $1,25 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$  έως 100 για μηδενική προεξοχή που λαμβάνεται με την τοποθέτηση του ποδιού πίεσης και του διεισδυτή σε σταθερή επαφή με κατάλληλη ευθεία σκληρή επιφάνεια (πχ γυαλί).

#### Βαθμονομημένο ελατήριο

Αυτό χρησιμοποιείται για να εφαρμόσει μια δύναμη,  $F$ , εκφρασμένη σε millinewtons, στον διεισδυτή σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$F = 324 + 4,4H_{AM}$  όπου  $H_{AM}$  είναι η σκληρότητα που λαμβάνουμε από την ανάγνωση του σκληρόμετρου τύπου AM.

### Αυτόματη συσκευή με χρονοδιακόπτη (προαιρετικά)

Ο χρονοδιακόπτης ενεργοποιείται αυτόματα όταν το πόδι πίεσης είναι σε επαφή με το δοκίμιο και υποδεικνύει το τέλος του χρόνου δοκιμής ή κλειδώνει την τιμή δοκιμής κατά την ολοκλήρωσή της. Η χρήση μιας συσκευής με χρονοδιακόπτη για τον χρόνο δοκιμής βελτιώνει την ακρίβεια. Όταν το όργανο χρησιμοποιείται σε βάση, η χρονική ανοχή πρέπει να είναι  $\pm 0,3$  s.

### **Τοποθέτηση**

Η αρχική ιδέα του σκληρόμετρου ήταν η δημιουργία ενός φορητού οργάνου που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί, για παράδειγμα σε ένα αντικείμενο το οποίο βρίσκεται εν λειτουργία ή είναι τοποθετημένο στη θέση λειτουργία του.. Ωστόσο, μπορεί να αναμένεται καλύτερη ακρίβεια χρησιμοποιώντας μια βάση με κεντρικό βάρος στον άξονα του δισειδυτή για να εφαρμόσει το πόδι πίεσης στο δοκίμιο. Οι τύποι Durometer A, D και AO μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως όργανα χειρός είτε τοποθετημένα σε βάση. Τα σκληρόμετρα τύπου AM πρέπει να είναι πάντα τοποθετημένα σε βάση. Σαφώς, όταν χρησιμοποιείται μια βάση, η φορητότητα χάνεται.

Ως γενικός κανόνας, αναμένεται ότι η ακρίβεια θα ακολουθήσει τη σειρά:

Σκληρόμετρο χειρός < Σκληρόμετρο χειρός εφοδιασμένο με χειροκίνητη χειρολαβή < Σκληρόμετρο χρησιμοποιώντας βάση < Σκληρόμετρο εξοπλισμένο με χρονοδιακόπτη και χρήση βάσης.

Η ακρίβεια επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως σφάλμα παραλλαγής (parallax error), χρόνος εφαρμογής φορτίου, ταχύτητα εφαρμογής του φορτίου στο πόδι και τον προσανατολισμό του δοκιμίου.

Η βάση λειτουργίας πρέπει να είναι ικανή να στηρίζει την επιφάνεια πίεσης-ποδιού του χρονομέτρου παράλληλα με τον πίνακα στήριξης δοκιμίου.

Η βάση πρέπει να μπορεί να εφαρμόζει το δοκίμιο στον διεισδυτή ή αντίστροφα, χωρίς πρόβλημα.

Η συνολική μάζα του σκληρόμετρου και η έξτρα μάζα που πρέπει να ξεπεράσει η δύναμη του βαθμονομημένου ελατηρίου πρέπει να είναι:

-1<sub>0</sub><sup>+0,1</sup> kg για τους τύπους A και AO

-5<sub>0</sub><sup>+0,1</sup> kg για τους τύπους D

-0,25<sub>0</sub><sup>+0,05</sup> kg για τους τύπους AM

Ενδειγμένη τιμή ντουρομέτρου	Δύναμη ελατηρίου σε mN		
	τύπος AM	τύπος A και AO	Τύπος D
0	324	550	-
10	368	1300	4450
20	412	2050	8900
30	456	2800	13350
40	500	3550	17800
50	544	4300	22250
60	588	5050	26700
70	632	5800	31150
80	676	6550	35600
90	720	7300	40050
100	764	8050	44500
<b>mN ανά μονάδα</b>	4,4	75	445
<b>Ανοχή δύναμης ελατηρίου</b>	±8,8	±37,5	±222,5

Πίνακας 2.3 Βαθμονόμηση δύναμης ελατηρίου σκληρόμετρου [46]

### Δοκίμια

### Πάχος

Για τον προσδιορισμό της σκληρότητας με τη χρήση σκληρόμετρων τύπου A, D και AO, το πάχος του δοκιμίου πρέπει να είναι τουλάχιστον 6 mm.

Για τον προσδιορισμό της σκληρότητας με τη χρήση σκληρομέτρων τύπου AM, το πάχος του δοκιμίου πρέπει να είναι τουλάχιστον 1,5 mm.

Για στρώματα λεπτότερα από 6 mm και 1,5 mm (βλέπε παραπάνω), το δοκίμιο μπορεί να αποτελείται όχι περισσότερο από τρία στρώματα, προκειμένου να επιτευχθεί το απαραίτητο πάχος.

Παρατήρηση: Μετρήσεις που θα πραγματοποιηθούν σε λεπτά δοκίμια από μαλακό ελαστομερές θα επηρεαστούν από το υποστηρικτικό τραπέζι δοκιμών και θα δώσουν πολύ υψηλά αποτελέσματα

### Επιφάνεια

Οι άλλες διαστάσεις των δοκιμών θα πρέπει να είναι ικανές να επιτρέπουν μετρήσεις σε απόσταση τουλάχιστον 12mm από οποιαδήποτε άκρη για τους τύπους A και D, και 15mm και 4,5mm αντίστοιχα για τους τύπους AO και AM.

Η επιφάνεια του δοκιμίου πρέπει να είναι επίπεδη και παράλληλη σε επιφάνεια ικανή να επιτρέψει στο πόδι πίεσης να έρθει σε επαφή με το δοκίμιο πάνω σε μια περιοχή με ακτίνα τουλάχιστον 6 mm από το σημείο διείδυσης για τους τύπους A και D, 9 mm για τον τύπο AO και 2,5 mm για τον τύπο AM.

Δεν μπορούν να γίνουν ικανοποιητικοί προσδιορισμοί σκληρότητας σε στρογγυλεμένες, ανώμαλες ή τραχιές επιφάνειες με την χρήση σκληρομέτρου. Ωστόσο, αναγνωρίζεται η χρήση τους σε ορισμένες εξειδικευμένες εφαρμογές, π.χ. ISO 48-7 [52] για το προσδιορισμό της σκληρότητας ελαστομερών καλυμμένων κυλίνδρων. Σε τέτοιες εφαρμογές, οι περιορισμοί χρήσης θα πρέπει να προσδιοριστούν ξεκάθαρα.

### Κλιματισμός και θερμοκρασία δοκιμίου

Για όλους τους σκοπούς των δοκιμών, ο ελάχιστος χρόνος μεταξύ βουλκανισμού και δοκιμής πρέπει να είναι 16 ώρες. Οπου πρακτικά, τα δοκίμια προετοιμάζονται αμέσως πριν από τη δοκιμή για τουλάχιστον 1 ώρα σε μία από τις προκαθορισμένες θερμοκρασίες εργαστηρίου σύμφωνα με το ISO 23529[53]. Θα χρησιμοποιηθεί η ίδια θερμοκρασία σε κάθε μεμονωμένη δοκιμή ή σειρά δοκιμών που προορίζονται ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα.



## Διαδικασία

### Γενικά

Τοποθετούμε το δοκίμιο σε μία ευθεία, σκληρή και άκαμπτη επιφάνεια. Εναποθέτουμε το πόδι πίεσης στο δοκίμιο ή αντίστροφα όσο το δυνατόν γρηγορότερα αλλά όχι βιαία, διατηρώντας το πόδι πίεσης παράλληλο με την επιφάνεια του δοκιμίου και διασφαλίζοντας ότι ο διεισδυτής είναι κανονικά τοποθετημένος στην επιφάνεια του ελαστομερούς.

### Χρόνος δοκιμής

Εφαρμόζουμε μια δύναμη σύμφωνα με τα παραπάνω, ικανή ώστε να υπάρχει σταθερή επαφή μεταξύ του διεισδυτή και του δοκιμίου και λαμβάνουμε την τιμή την συγκεκριμένη στιγμή που το πόδι πίεσης είναι σε σταθερή επαφή με το δοκίμιο. Ο ενδεδειγμένος χρόνος είναι 3sec για βουλκανισμένο ελαστομερές και 15 sec για θερμοπλαστικό. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν άλλοι χρόνοι δοκιμής, υπό την προϋπόθεση ότι αναφέρονται στην έκθεση δοκιμής. Ελαστομερή άγνωστων τύπων πρέπει να αντιμετωπίζονται ως βουλκανισμένα.

Παρατήρηση: Προτείνεται χρόνος δοκιμής 15 δευτερολέπτων για θερμοπλαστικό ελαστομερές επειδή η τιμή σκληρότητας συνεχίζει να μειώνεται για μεγαλύτερη περίοδο σε σχέση με τα βουλκανισμένα ελαστομερή. Αυτός ο χρόνος δοκιμής είναι ίδιος με των πλαστικών σύμφωνα με το ISO 868[45].

### Μετρήσεις

Πρέπει να γίνουν 3 (για γνωστό υλικό) και 5 (για αγνωστο υλικό) μετρήσεις σκληρότητας σε διαφορετικά σημεία του δοκιμίου έχοντας μεταξύ τους απόσταση τουλάχιστον 6mm για τους τύπους A, D και AO και 0,8mm για τον τύπο AM και να υπολογιστεί η μέση τιμή. Εάν το χρονικό διάστημα μετά το οποίο λήφθηκε κάθε ένδειξη είναι διαφορετικό από 3 δευτερόλεπτα, καταγράφουμε ανεξάρτητα τις τιμές της σκληρότητας διείσδυσης μαζί με το χρονικό διάστημα μετά το οποίο αναγνώστηκε η τιμή και προσδιορίζουμε τη μέση τιμή και τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές που αποκτήθηκαν.

### Βαθμονόμηση

Το όργανο βαθμονομείται τακτικά χρησιμοποιώντας κατάλληλα όργανα για τη μέτρηση της δύναμης, το βάθος διείσδυσης και την γεωμετρία διείσδυσης σύμφωνα με το ISO 48-9 [54].

### Έλεγχος με χρήση συγκεκριμένων δοκιμίων ελαστομερών

Πιέζουμε το όργανο σε μια κατάλληλη ευθεία, σκληρή επιφάνεια (πχ γυαλί) και προσαρμόζουμε όπου αυτό είναι δυνατό ώστε να μας δώσει τιμή σκληρότητας 100. Συνεχίζουμε τον έλεγχο του οργάνου χρησιμοποιώντας ένα σύνολο τυπικών ελαστομερών ομαδοποιημένων τεμαχίων που καλύπτουν όλο το εύρος μέτρησης. Όλες οι προσαρμογές γίνονται σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. Το σετ από τυποποιημένα ελαστομερή τεμάχια που χρησιμοποιούνται πρέπει να αποτελούνται από τουλάχιστον τρία μπλοκ αναφοράς σε ένα κατάλληλο καλυμμένο δοχείο μακριά από φως, θερμότητα, λάδι και γράσο. Τα εν λόγω τεμάχια βαθμονομούνται μία φορά το χρόνο, ή περισσότερες αν η κύρια τιμή διαφέρει από τα πιστοποιημένα τεμάχια αναφοράς.

Η βαθμονόμηση των μπλοκ αναφοράς πρέπει να γίνει με μια συσκευή μέτρησης αναφοράς ενός διαπιστευμένου εργαστήριου. Τα όργανα τακτικής χρήσης ελέγχονται τουλάχιστον κάθε εβδομάδα σύμφωνα με το πρότυπο των ελαστομερών ομαδοποιημένων τεμαχίων.

### Έκθεση δοκιμής

Η έκθεση δοκιμής περιλαμβάνει τις ακόλουθες πληροφορίες:

α) λεπτομέρειες δείγματος

1) πλήρη περιγραφή του δείγματος και της προέλευσής του

2) περιγραφή του δοκιμίου, συμπεριλαμβανομένου του πάχους του και, στην περίπτωση σύνθετου δοκιμίου των αριθμό των στρώσεων

β) τη μέθοδο δοκιμής που χρησιμοποιήθηκε, δηλαδή τον αριθμό αναφοράς αυτού του εγγράφου (ISO 48-4: 2018 [46]) ·

γ) λεπτομέρειες δοκιμής

- 1) τη θερμοκρασία της δοκιμής και τη σχετική υγρασία όταν η σκληρότητα του υλικού εξαρτάται από την υγρασία.
- 2) τον τύπο του χρησιμοποιούμενου οργάνου, συμπεριλαμβανομένου του εάν ήταν χειρός ή σε βάση
- 3) αριθμός μετρήσεων
- 4) ο χρόνος που πέρασε μεταξύ της προετοιμασίας του δοκιμίου και της μέτρησης της σκληρότητας του
- 5) λεπτομέρειες για οποιαδήποτε απόκλιση από την τυπική διαδικασία
- 6) λεπτομέρειες για οποιεσδήποτε ενέργειες δεν περιγράφονται στο πρότυπο και συμβάντα που μπορούν να επηρεάσουν το αποτέλεσμα
- δ) το αποτέλεσμα της δοκιμής, εκφραζόμενο ως ακέραιος αριθμός, μαζί με την κλίμακα που χρησιμοποιείται, π.χ. 75 Shore A (A75);
- ε) την ημερομηνία της δοκιμής

### 3. Εργαστηριακές Δοκιμές

#### 3.1 Μονωτήρες

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας έγιναν μετρήσεις σκληρότητας στο ελαστομερές περίβλημα συνθετικών μονωτήρων τριών διαφορετικών κατασκευαστών, οι οποίοι ήταν εγκατεστημένοι στο δίκτυο μέσης τάσης. Οι μονωτήρες παραχωρήθηκαν από το Διαχειριστή του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (Δ.Ε.Δ.Δ.Η.Ε.) για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας.

Οι μονωτήρες αποξηλώθηκαν κατά τη διάρκεια εργασιών αναβάθμισης και συντήρησης του δικτύου (αντικατέστησαν κεραμικούς μονωτήρες). Πρόκειται για τρεις μονωτήρες ανάρτησης και ένα μονωτήρα στήριξης ονομαστικής τάσης λειτουργίας 24kV.



Εικόνα 3.1 Οι μονωτήρες στους οποίους πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις

##### 3.1.1 Προδιαγραφές Μονωτήρων ΔΕΔΔΗΕ (ΔΕΗ)

Οι συνθετικοί μονωτήρες, βάσει των τεχνικών προδιαγραφών κατασκευής που έχει θέσει η ΔΕΗ [55], αποτελούνται από:

- τον εσωτερικό πυρήνα από εποξική ρητίνη ενισχυμένη με υαλονήματα
- το εξωτερικό μονωτικό περίβλημα το οποίο κατασκευάζεται από βουλκανισμένο σε υψηλή θερμοκρασία ελαστομερές σιλικόνης (High Temperature Vulcanized – HTV – silicone rubber) με ελάχιστη περιεκτικότητα σε πολύ-διμεθυλ-σιλοξάνη 37%.
- μεταλλικούς ακροδέκτες από μαλακό χυτοσίδηρο εν θερμώ ψευδαργυρωμένους (ελάχιστου πάχους ψευδαργύρωσης 86μm) με συναρμογή τέτοια ώστε να αποκλείεται η χαλάρωση και η είσοδος υγρασίας στον πυρήνα.

Τα μεταλλικά εξαρτήματα των μονωτήρων ανάρτησης είναι διαμέτρου Φ16Α και συνεργάζονται με τα αντίστοιχα υπάρχοντα εξαρτήματα ανάρτησης ball n socket. Οι δε μονωτήρες στήριξης φέρουν στο ένα άκρο τους μεταλλικό εξάρτημα για τη στήριξη του αγωγού, και στο άλλο άκρο μεταλλικό, κοχλιοτομημένο - σε όλο το μήκος του - στέλεχος στήριξης μήκους 220 mm [55]

Χαρακτηριστικά		Μονωτήρες Στήριξης	Μονωτήρες Ανάρτησης
Μήκος ερπυσμού, ελάχιστο	m m	610	900
Αντοχή σε τάση βιομηχανικής συχνότητας εν υγρώ, επί 1 min	kV	50	50
Αντοχή σε κρουστική τάση μορφής 1,2/50μs	kV	145	145
Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (SML)	kN	-	120
Ενδεικτικό συνολικό μήκος μονωτήρα	m m	-	440
Μέγιστη αντοχή σε κάμψη (SCL)	kN	11	-
Μέγιστο καμπτικό φορτίο σχεδιασμού (MDCL)	kN	4	-
Ακτίνα κορυφαίας αύλακος	m m	19 ± 3	-
Ακτίνα πλευρικής αύλακος	m m	14 ± 2	-
Ελάχιστη περιεκτικότητα του ελαστομερούς σιλικόνης σε πολυ-διμεθυλ-σιλοξάνη (PDMS)	%	37	37

Πίνακας 3.1 Τεχνικές προδιαγραφές (ΔΕΗ) συνθετικών μονωτήρων δικτύου διανομής ΗΕ [55]

Οι μονωτήρες έχουν προδιαγραφές για τις παρακάτω περιβαλλοντικές συνθήκες:

Μέγιστη θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος	+40°C
Μέγιστη μέση τιμή της θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος που μετράται σε περίοδο 24 ωρών	+35°C
Ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος	-20°C
Μέση διάρκεια ηλιοφάνειας	2800 hr/year
Μέγιστη μέση οριζόντια πίεση ανέμου σε επίπεδες επιφάνειες	70 kP/m <sup>2</sup>

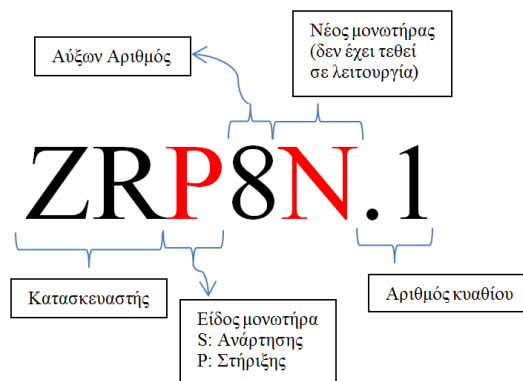
Πίνακας 3.2 Περιβαλλοντικές συνθήκες υπό τις οποίες οι μονωτήρες λειτουργούν βάσει τεχνικής προδιαγραφής ΔΕΗ [55]

### 3.1.2 Κωδικοποίηση

Προκειμένου να κατηγοριοποιηθούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων διαφορετικών μονωτήρων και να αρχειοθετηθούν ορθά, συμφωνήθηκε συγκεκριμένη κωδικοποίηση με την οποία προστατεύονται τυχόν ευαίσθητα εταιρικά δεδομένα.

Τα δύο πρώτα γράμματα της κωδικής ονομασίας προέρχονται από το όνομα (της κατασκευάστριας εταιρίας του μονωτήρα. Το τρίτο γράμμα συμβολίζει τη θέση του μονωτήρα στο δίκτυο: για τους μονωτήρες ανάρτησης είναι το γράμμα S (Suspension) ενώ για τους μονωτήρες στήριξης το λατινικό γράμμα P (Post).

Ακολουθεί ο αύξων αριθμός ο οποίος δόθηκε βάσει της σειράς εξέτασης και της υποβολής δοκιμών στον μονωτήρα και τέλος, το γράμμα N (new) αν ο μονωτήρας είναι καινούριος δηλαδή δεν έχει τεθεί σε λειτουργία ή εγκατασταθεί στο δίκτυο. Ο αριθμός του κυαθίου συνοδεύει την κωδική ονομασία του μετά την τελεία. Στους μονωτήρες στήριξης η αρίθμηση των κυαθίων ξεκινά από τον υπό τάση ακροδέκτη, ενώ στους μονωτήρες ανάρτησης η αρίθμηση ξεκινά από τον ακροδέκτη έδρασης (socket). Έτσι, με αναφορά στην κωδική ονομασία του μονωτήρα γίνεται άμεση πληροφόρηση για τα βασικά χαρακτηριστικά του.



Εικόνα 3.2 Επεξήγηση κωδικοποίηση ονομασίας των μονωτήρων

### 3.1.3 Γεωγραφικά Χαρακτηριστικά

Οι μονωτήρες με την κωδική ονομασία ZBS και ZRS αποξηλώθηκαν από την ευρύτερη περιοχή Ελευσίνας-Μάνδρας της Περιφέρειας Αττικής, από υψόμετρο περίπου 110 μέτρων και απόστασης περίπου 5 χιλιομέτρων από την πλησιέστερη ακτή. Ήταν εκτεθειμένοι σε συνθήκες ξηρασίας κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου και έντονης υγρασίας και βροχοπτώσεων κυρίως κατά τη χειμερινή περίοδο.

Οι μονωτήρες με την κωδική ονομασία GN αποξηλώθηκαν από την ευρύτερη περιοχή του Αλιβερίου. Ήταν εγκατεστημένοι σε πολύ χαμηλό υψόμετρο και σε απόσταση από την θάλασσα μικρότερη των 2 km

Στην περιοχή της Μάνδρας η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 14°C και 24°C ενώ έχουν καταγράψει ακραίες άνω και κάτω θερμοκρασίες της τάξης των -3°C και 38°C αντίστοιχα. Η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι 4,9 km/hr (περίπου 1 μποφόρ) ενώ σε μηνιαία βάση καταγράφονται άνεμοι μεγάλης έντασης (από 6 έως 8 μποφόρ) [56].

Στην περιοχή του Αλιβερίου η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 16°C και 26°C ενώ έχουν καταγράψει ακραίες άνω και κάτω θερμοκρασίες της τάξης των -3°C και 38°C αντίστοιχα. Η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι 5,9 km/hr (περίπου 1.5 μποφόρ) ενώ σε μηνιαία βάση καταγράφονται άνεμοι μεγάλης έντασης (από 6 έως 8 μποφόρ) [57].

Οι μονωτήρες που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις σκληρότητας της παρούσας διπλωματικής εργασίας συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Κωδική Ονομασία	Έτος Κατασκευής	Έτος Αποξήλωσης	Αριθμός Κυαθίων	Μήκος Ερπυσμού (mm)	Μον. Ειδικό Μήκος Ερπυσμού (mm/kV)	Έτη λειτουργίας στο δίκτυο
ZBS1	2010	2019	9	910	78,81	9
ZRS2N	2018	-	9	910	78,81	-
GNS3	2015	2019	7	730	63,22	4
GNP4	2010	2020	7	730	63,22	9

Πίνακας 3.3 Στοιχεία συνθετικών μονωτήρων

## 3.2 Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας

### 3.2.1. Προετοιμασία των δοκιμών

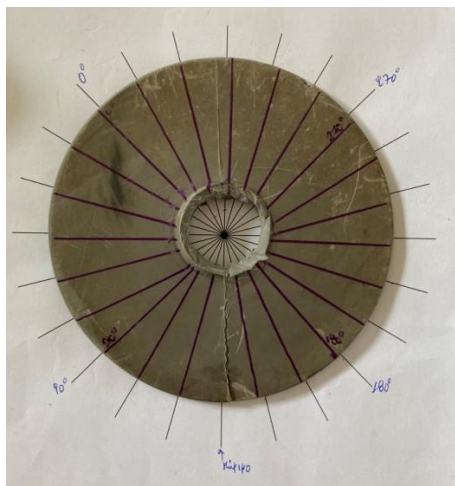
Στην Εικόνα 3.3.φαίνονται τα εργαλεία (χάρακας,κοπίδι) που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προετοιμασία των μονωτήρων, κατά την αφαίρεση δηλαδή των κυαθίων από το κέλυφος και την χάραξη τους, όπως επίσης το πιστοποιημένο ντουρόμετρο που πραγματοποίησε τις μετρήσεις (βλ Εικόνα 3.10). Αφαιρέθηκαν τρία κυάθια από κάθε μονωτήρα (τα δύο ακραία και ένα κυάθιο από τη μέση του) με τη βοήθεια κοπιδιού όπως φαίνεται επίσης στην διπλανή εικόνα. Κατά την κοπή και την προετοιμασία των μονωτήρων γίνεται προσπάθεια με το κοπίδι να καθαριστούν καλά τα περισευούμενα μέρη των κυαθίων ώστε αυτά να πατάνε καλά μεταξύ τους για καλύτερες μετρήσεις, αλλά αυτό είναι αδύνατο να επιτευχθεί χωρίς να υπάρχουν μικρές αποκλίσεις στην εφαρμογή των κυαθίων



Εικόνα 3.3 Αφαιρούμενα κυάθια και εργαλεία/όργανα που χρησιμοποιήθηκαν



Για να μπορέσουμε να μετρήσουμε τη σκληρότητα των κυαθίων του κάθε μονωτήρα σε πολλά σημεία και υπό διαφορετικές γωνίες, χωρίσαμε ισομερώς το κάθε κυάθιο ανά 15 μοίρες (βλ. Εικόνα 3.7) κρατώντας ως σταθερό σημείο αναφοράς το σημείο κοπής του μονωτήρα από το περίβλημα του

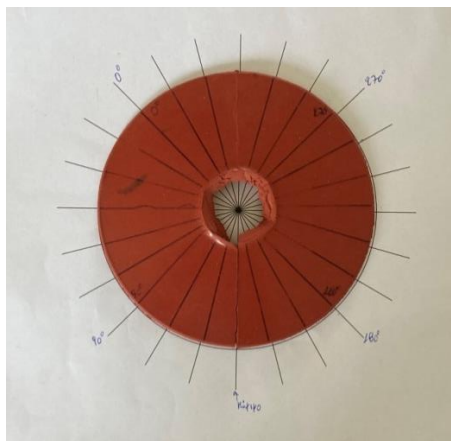


Εικόνα 3.4 Προετοιμασία μονωτήρα ZBS1 τύπου ανάρτησης (ball & socket) με περίβλημα ελαστομερούς σιλικόνης

Σε κάθε τεταρτημόριο των 15 μοιρών πραγματοποιήθηκαν 7 μετρήσεις ανά 5 mm με κατεύθυνση από το εξωτερικό περίβλημα του συνθετικού μονωτήρα προς το εσωτερικό του. Για του συνθετικούς μονωτήρες GNS3 και GNP4 ελήφθησαν 5 μετρήσεις ανά 5 mm με κατεύθυνση επίσης από το εξωτερικό περίβλημα προς το εσωτερικό τους λόγω μικρότερης μεγέθους του κυαθίου

Ο μονωτήρας ZBS1 είναι τύπου ανάρτησης (ball & socket), έχει μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (SML-Specified Mechanical Load) 120kN και ήταν εγκατεστημένος στο δίκτυο μέσης τάσης του ΔΕΔΔΗΕ για 9 χρόνια, από το 2010 έως το 2019.

Ο συνθετικός μονωτήρας ZRS2N κατασκευάστηκε το 2018 και δεν είχε τοποθετηθεί στο δίκτυο Μέσης Τάσης. Ο ZRS2N είναι μονωτήρας ανάρτησης με ονομαστική μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό ( SML) 120kN και το περίβλημά του φέρει 9 κυάθια από SiR(Silicon Rubber).



Εικόνα 3.5 Προετοιμασία μονωτήρα ZRS2N τύπου ανάρτησης (ball & socket) με περίβλημα ελαστομερούς σιλκόνης

Οι συνθετικοί μονωτήρες GNS3 και GNP4 κατασκευάστηκαν το 2015 και 2010 αντίστοιχα και είχαν τοποθετηθεί στο δίκτυο Μέσης Τάσης με 4 και 9 έτη αντίστοιχα λειτουργίας στο δίκτυο διανομής. Ο GNS3 είναι μονωτήρας ανάρτησης με ονομαστική μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (Specified Mechanical Load) 120kN και το περίβλημά του φέρει 7 κιάθια από SiR. ενώ ο GNP4 είναι στήριξης και το περίβλημά του φέρει επίσης 7 κιάθια. Στην Εικόνα 3.9 βλέπουμε τα αφαιρεθέντα κιάθια, τα οποία θα τοποθετηθούν στον προσομοιωτή χάραξης ώστε να διαβαθμιστούν ανάλογα. Βλέπουμε ότι ο εσωτερικός δακτύλιος του GNS3 είναι μεγαλύτερος σε διάμετρο με αποτέλεσμα να πραγματοποιηθούν 5 μετρήσεις και όχι 7.



Εικόνα 3.6 Προετοιμασία μονωτήρων GNS3 και GNP 4 με περίβλημα ελαστομερούς σιλκόνης

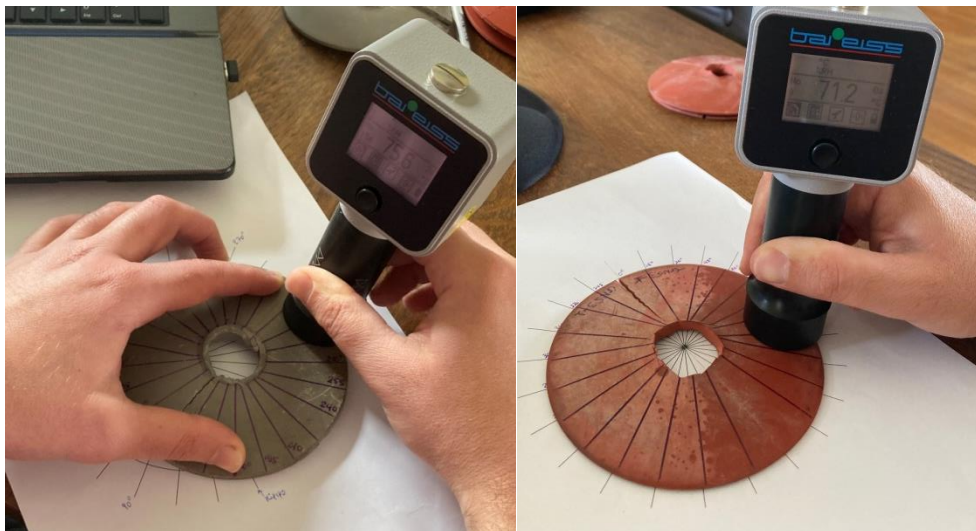
### 3.2.2 Μέτρηση της σκληρότητας Shore A

Στο Κεφάλαιο 2 αναλύθηκαν διεξοδικά τα πρότυπα και η διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί ώστε να προχωρήσουμε στις μετρήσεις σκληρότητας και στην καταγραφή των αποτελεσμάτων μέσω πιστοποιημένου σκληρομέτρου που μας χορηγήθηκε από το προσωπικό του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του ΕΜΠ.



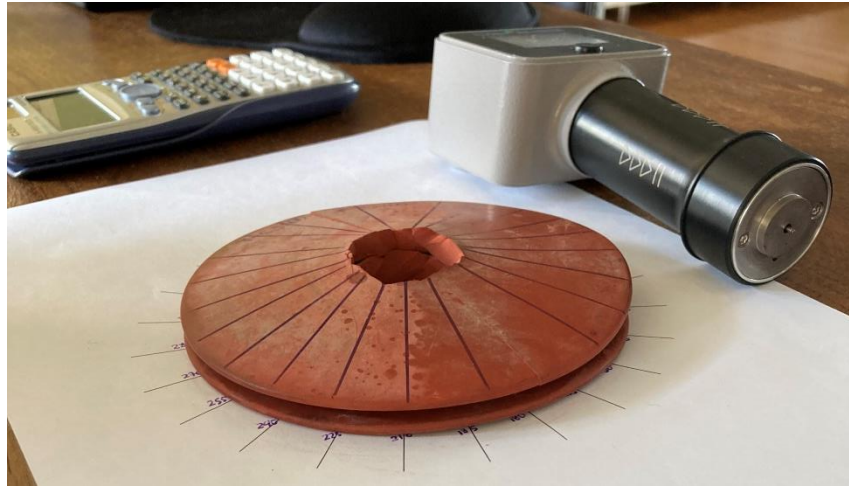
Εικόνα 3.7 Ηλεκτρονικός μετρητής σκληρότητας της εταιρίας Bareiss [70]

Ο πρώτος κύκλος μετρήσεων για κάθε μονωτήρα ολοκληρώθηκε με την μέτρηση της σκληρότητας σε 1 κιάθιο.



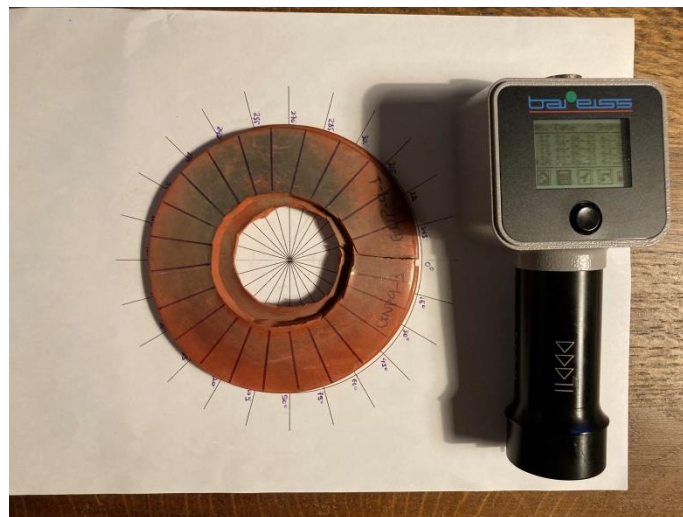
Εικόνα 3.8 Μέτρηση σκληρότητας σε 1 κιάθιο μονωτήρων τύπου ανάρτησης (ball & socket) με περίβλημα ελαστομερούς σιλικόνης

Ο 2ος κύκλος μετρήσεων πραγματοποιήθηκε με τις μετρήσεις σκληρότητας σε 2 κιάθια, με την μετρούμενη άνω επιφάνεια να είναι πάντα η αρχική και με την συχνότητα: 7 μετρήσεις ανά γραμμή ανά 15 μοίρες σε απόσταση 5mm.



Εικόνα 3.9 Μέτρηση σκληρότητας σε 2 κιάθια μονωτήρων τύπου ανάρτησης (ball & socket) με περίβλημα ελαστομερούς σιλικόνης

Ο 3ος κύκλος μετρήσεων πραγματοποιήθηκε με τις μετρήσεις σκληρότητας σε 3 κιάθια, με την μετρούμενη άνω επιφάνεια να είναι πάντα η αρχική και με την συχνότητα μετρήσεων: 7 μετρήσεις ανά γραμμή ανά 15 μοίρες σε απόσταση 5mm. (εκτός από τους μονωτήρες GNS3 και GNP4 όπου πραγματοποιήθηκαν 5 μετρήσεις λόγω μικρότερου μεγέθους κιαθίου όπως εξηγήσαμε παραπάνω)



Εικόνα 3.10 Μέτρηση σκληρότητας σε 3 κιάθια μονωτήρων τύπου ανάρτησης (ball & socket) με περίβλημα ελαστομερούς σιλικόνης

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 1152 μετρήσεις οι οποίες καταγράφηκαν σε αρχείο .xcl από το οποίο προέκυψε ο μέσος όρος σκληρότητας, η τυπική απόκλιση μέτρησης, ο συνολικός μέσος όρος σκληρότητας και τυπικής απόκλισης για κάθε κιάθιο.

## 3.3 Πίνακες καταγραφής μετρήσεων και αποτελεσμάτων

## ZBS1-7

μοίρες σημεία	0	15	30	60	75	90	105	120	165	180	195	210	240	255	270	285	300	345	Μ.Ο.	Τυπική Απόκλιση
1	71,9	72,2	72,2	72,4	75,4	74,4	76,4	75,6	75,6	73,1	76,6	77,8	74,4	76,1	74,3	73,5	74,9	74,1	72,52	1,71
2	73,0	71,6	73,8	74,7	75,3	70,9	73,7	74,7	74,7	77,2	77,1	76,8	76,9	76,7	76,5	76,7	73,8	72,4	74,80	1,99
3	70,2	71,6	69,2	71,3	74,2	71,4	70,9	72,3	72,3	75,5	72,8	75,1	74,0	73,1	72,7	75,8	71,1	72,1	72,53	1,82
4	69,8	69,5	69,6	70,9	68,6	66,7	69,1	70,0	69,0	69,6	69,8	67,4	68,6	67,8	68,9	69,0	66,7	69,1	68,89	1,12
5	68,6	68,1	67,4	71,0	70,2	66,3	68,9	70,1	69,5	67,1	67,6	70,3	67,2	67,3	67,6	67,7	68,1	70,1	69,40	1,38
6	69,7	67,6	67,7	68,1	69,6	66,2	67,0	69,7	66,8	64,8	66,9	69,7	69,4	69,6	70,8	68,4	67,6	68,8	68,24	1,55
7	68,9	69,4	68,2	69,3	67,1	71,1	70,3	68,8	71,3	69,8	69,1	69,3	68,2	69,0	68,9	69,8	68,1	69,1	69,20	1,02
																			70,80	1,51

Πίνακας 3.4 Μετρήσεις σκληρότητας ανά σημείο/μοίρες στο κιάθιο 7 του μονωτήρα ZBS1

**ZBS1-7 & ZBS1-5**

μοίρες σημεία	0	15	30	60	75	90	105	120	165	180	195	210	240	255	270	285	300	345	Μ.Ο.	Τυπική Απόκλιση
1	66,3	67,1	68,7	71,2	71,7	70,4	67,1	69,9	70,2	70,1	69,1	70,8	69,2	71,4	69,9	71,4	69,2	73,1	69,82	1,75
2	66,5	67,4	66,7	71,9	70,7	70,2	71,1	68,9	68,2	69,1	69,3	71,7	71,8	71,4	71,1	71,7	71,1	72,7	70,08	1,90
3	66,4	69,3	70,7	69,5	69,3	66,9	69,6	68,8	70,6	70,7	66,2	69,3	72,0	69,8	70,1	71,1	71,9	71,2	69,63	1,70
4	67,2	70,2	69,6	69,8	69,9	68,0	66,4	68,9	68,8	71,6	67,8	66,5	69,3	73,0	71,9	71,0	70,2	71,1	69,51	1,85
5	66,2	67,1	69,0	68,9	69,3	66,2	70,5	69,3	70,9	70,7	70,4	69,3	73,4	71,1	68,8	69,0	71,5	72,4	69,66	1,93
6	67,0	69,7	69,9	68,8	69,3	68,8	69,4	69,5	69,8	69,3	73,0	71,9	72,0	72,0	73,3	72,1	73,5	72,1	70,63	1,86
7	66,4	66,8	68,9	69,2	69,0	66,1	65,9	70,1	69,3	69,3	71,4	71,0	70,6	69,8	71,0	70,0	72,8	71,3	69,38	1,97
																			69,81	1,85

Πίνακας 3.5 Μετρήσεις σκληρότητας ανά σημείο/μοίρες στο κιάθιο 7 του μονωτήρα ZBS1 το οποίο τοποθετήθηκε πάνω στο κιάθιο 5 του μονωτήρα ZBS1 για αύξηση του πάχους του δοκιμίου

**ZBS1-7 & ZBS1-5 & ZBS1-3**

μείρες σημεία	0	15	30	60	75	90	105	120	165	180	195	210	240	255	270	285	300	345	Μ.Ο.	Τυπική Απόκλιση
1	66,4	66,8	68,9	69,2	69,0	66,1	65,9	70,1	69,3	69,3	71,4	71,0	70,6	69,8	71,0	70,0	72,8	71,3	69,38	1,97
2	67,8	66,4	64,2	65,4	67,3	64,1	64,3	66,7	66,3	66,8	70,1	69,3	68,2	69,0	68,9	68,8	68,1	67,3	67,16	1,81
3	69,0	68,1	67,7	69,7	67,9	67,2	68,4	65,8	70,1	71,0	73,1	69,6	67,0	72,4	70,9	69,0	71,0	69,1	69,27	1,91
4	66,3	66,8	69,1	65,2	67,1	64,1	64,3	66,7	66,4	66,8	69,1	69,3	68,2	69,0	68,9	69,8	68,1	67,1	67,35	1,71
5	66,1	66,8	65,3	66,6	69,2	67,0	68,9	69,2	70,5	72,9	71,6	71,7	71,2	72,1	71,9	72,6	70,6	71,0	69,73	2,43
6	69,8	68,0	66,3	67,1	68,8	67,1	67,4	68,2	69,8	71,3	73,8	73,1	71,3	72,7	72,1	72,7	66,8	70,3	69,81	2,45
7	69,0	68,1	67,7	69,7	67,9	67,2	68,4	65,8	70,1	71,0	73,1	69,6	67,0	72,4	70,9	69,0	71,0	69,1	69,27	1,91
																			68,85	2,03

Πίνακας 3.6 Μετρήσεις σκληρότητας ανά σημείο/μείρες στα κιάθια μονωτήρα ZBS1-7 , ZBS1-5 και ZBS1-3

**ZRS9N-7**

μοίρες σημεία	0	15	30	60	75	90	105	120	165	180	195	210	240	255	270	285	300	345	Μ.Ο.	τυπική απόκλιση
1	56,3	57,5	54,6	57,1	56,7	56,5	54,5	58,7	57,4	56,1	54,9	59,0	57,0	57,1	58,5	55,1	57,9	58,0	56,83	1,38
2	56,9	58,7	57,7	59,5	57,9	56,2	58,3	58,7	57,5	55,5	55,4	59,4	55,1	58,0	58,8	56,5	57,1	57,2	57,47	1,34
3	59,0	55,3	56,7	57,0	56,9	57,0	58,8	59,2	57,5	56,0	56,1	60,0	57,1	57,4	55,4	57,6	55,6	59,5	57,34	1,44
4	56,8	54,9	55,8	56,7	56,9	54,2	56,7	56,9	57,8	56,5	55,2	58,2	56,8	56,8	55,9	55,7	54,8	56,2	56,27	1,04
5	54,9	54,1	55,0	55,9	56,3	56,1	57,2	56,5	56,6	56,5	54,4	57,6	55,9	56,5	55,3	56,1	55,2	55,0	55,84	0,95
6	54,5	55,7	52,7	52,2	52,1	52,2	53,5	55,0	54,9	54,3	53,4	56,7	53,1	55,7	54,1	56,5	56,0	54,6	54,29	1,49
7	55,0	55,0	52,6	56,5	55,8	54,1	52,5	56,6	55,6	53,0	54,8	54,4	54,4	55,2	55,8	56,6	53,9	54,5	54,79	1,27
																			56,12	1,27

Πίνακας 3.7 Μετρήσεις σκληρότητας ανά σημείο/μοίρες στο κιάθιο καινούργιου μονωτήρα ZRS9N-7



**ZRS9N-7 & ZRS9N-5**

μοίρες σημεία	0	15	30	60	75	90	105	120	165	180	195	210	240	255	270	285	300	345	Μ.Ο.	Τυπική Απόκλιση
<b>1</b>	49,8	50,3	49,3	51,4	49,5	49,1	50,8	49,8	50,4	51,5	50,8	50,3	48,1	51,4	50,8	51,1	49,6	50,4	50,24	0,91
<b>2</b>	47,7	49,1	47,6	49,2	46,6	46,0	48,4	50,4	50,8	50,9	51,3	49,4	49,3	51,3	51,7	52,1	48,8	47,9	49,36	1,79
<b>3</b>	51,8	51,3	52,8	50,6	47,3	50,2	53,9	54,9	53,3	53,0	55,6	52,6	49,3	51,2	50,2	52,7	50,0	48,8	51,64	2,17
<b>4</b>	50,9	52,2	51,3	50,6	49,6	52,6	53,5	52,3	51,7	55,2	54,9	54,1	54,7	54,3	51,5	55,9	54,9	55,1	53,07	1,89
<b>5</b>	49,8	52,2	54,1	51,0	50,8	50,2	50,4	51,2	52,2	51,8	55,6	51,8	51,2	54,0	55,2	54,4	52,3	53,4	52,31	1,75
<b>6</b>	50,4	51,4	51,7	51,4	48,3	53,0	51,2	48,7	52,9	53,1	54,5	50,2	48,3	53,6	55,6	55,1	54,7	54,1	52,12	2,32
<b>7</b>	52,7	49,8	51,8	51,8	51,0	49,1	50,9	51,3	50,0	49,2	50,7	48,7	48,2	51,5	50,4	49,7	49,8	51,9	50,47	1,24
																			51,32	1,72

Πίνακας 3.8 Μετρήσεις σκληρότητας ανά σημείο/μοίρες στα κυάθια καινούργιου μονωτήρα ZRS9N-7 & ZRS9N-5

**ZRS9N-7 & ZRS9N-5 & ZRS9N-3**

μοίρες σημεία	0	15	30	60	75	90	105	120	165	180	195	210	240	255	270	85	300	345	Μ.Ο.	Τυπική Απόκλιση
1	44,2	44,0	45,2	44,4	44,8	49,9	49,9	52,0	53,6	53,0	53,5	53,8	48,2	48,7	47,3	49,9	50,1	48,9	48,97	3,41
2	41,3	41,3	44,7	47,2	44,4	44,8	46,1	46,2	46,2	47,2	45,3	44,7	51,4	50,9	50,9	46,1	46,8	47,9	46,30	2,82
3	40,9	42,9	40,1	43,1	41,0	42,5	42,3	44,8	48,7	49,9	51,2	50,4	46,1	46,6	48,2	44,1	44,7	48,0	45,31	3,48
4	46,0	50,0	46,9	49,3	45,2	45,2	46,3	52,2	47,7	50,2	49,4	50,9	47,8	48,9	46,0	47,6	50,6	51,1	48,41	2,18
5	51,5	52,8	53,8	53,5	51,4	52,5	50,8	51,7	51,9	54,0	50,0	53,3	51,5	53,5	50,3	54,4	55,9	52,0	52,49	1,54
6	49,4	50,0	47,4	47,4	51,9	50,8	50,1	48,4	51,8	52,5	52,3	49,7	51,2	54,0	49,3	51,9	52,1	49,6	50,54	1,82
7	44,8	47,1	49,0	49,8	51,7	46,1	46,1	47,2	49,7	50,7	51,1	52,5	49,9	55,1	51,9	51,3	52,2	48,0	49,68	2,70
																			48,81	2,56

Πίνακας 3.9 Μετρήσεις σκληρότητας ανά σημείο/μοίρες στα κυάθια καινούργιου μονωτήρα ZRS9N-7 & ZRS9N-5 & ZRS9N-3

**GNS3-1**

μοίρες σημεία	0	15	30	60	75	90	105	120	165	180	195	210	240	255	270	285	300	345	Μ.Ο.	Τυπική Απόκλιση
1	72,6	71,1	70,8	69,7	69,0	69,8	71,4	70,9	70,5	70,9	72,0	71,1	72,4	70,1	71,9	70,7	71,0	69,0	70,93	1,03
2	70,4	71,6	70,0	70,3	69,8	68,7	71,7	70,8	69,6	71,1	70,2	70,8	68,6	71,6	72,0	70,8	71,2	70,4	70,54	0,96
3	69,5	71,3	70,3	72,0	69,4	70,2	70,0	70,1	69,3	71,0	72,0	71,5	70,9	70,4	71,1	70,8	71,7	72,0	70,67	0,89
4	70,9	70,3	71,0	69,3	71,9	69,9	70,4	68,2	71,1	70,9	72,2	71,0	70,2	69,7	70,2	71,1	70,4	71,3	70,51	0,93
5	70,1	71,0	68,7	71,2	69,9	71,1	72,0	68,6	71,9	72,0	70,5	70,8	72,2	71,4	72,0	70,9	71,1	70,9	70,90	1,04
																			70,71	0,97

Πίνακας 3.10 Μετρήσεις σκληρότητας ανά σημείο/μοίρες στο κύαθιο μονωτήρα GNS3-1

**GNS3-1 & GNS3-3**

μοίρες σημεία	0	15	30	60	75	90	105	120	165	180	195	210	240	255	270	285	300	345	Μ.Ο.	Τυπική Απόκλιση
<b>1</b>	68,0	67,4	68,7	68,6	70,7	67,4	67,5	70,1	70,2	69,1	68,0	70,1	69,2	68,0	68,9	71,4	68,0	67,4	68,81	1,24
<b>2</b>	67,4	69,9	70,9	70,3	69,7	68,6	71,1	70,0	68,0	68,8	68,4	71,7	70,9	67,0	67,4	68,3	67,5	66,1	69,00	1,62
<b>3</b>	69,1	69,3	70,7	69,5	69,3	68,7	69,6	73,9	67,6	70,7	71,2	69,3	69,7	67,5	70,3	66,1	71,9	70,0	69,68	1,73
<b>4</b>	68,2	70,4	69,8	69,7	69,9	68,0	65,5	68,9	68,8	71,6	70,0	72,1	69,3	67,1	71,8	67,0	71,2	68,4	69,31	1,78
<b>5</b>	66,7	67,1	72,1	68,9	69,3	67,2	70,5	69,3	70,9	68,7	70,4	69,3	68,4	71,1	68,9	69,0	71,5	69,1	69,35	1,50
																			69,23	1,57

Πίνακας 3.11 Μετρήσεις σκληρότητας ανά σημείο/μοίρες στα κύαθια μονωτήρα GNS3-1 & GNS3-3

**GNS3-1&GNS3-3&GNS3-5**

μοίρες σημεία	0	15	30	60	75	90	105	120	165	180	195	210	240	255	270	285	300	345	M.O.	Τυπική Απόκλιση
<b>1</b>	63,8	62,8	66,1	66,9	64,0	66,1	66,8	66,3	63,0	61,5	65,1	67,0	64,6	64,0	62,7	62,9	63,4	61,1	64,33	1,86
<b>2</b>	62,3	64,6	64,2	65,4	67,3	64,1	64,3	66,7	66,3	66,8	64,0	66,1	68,2	65,1	68,9	68,8	64,1	62,8	65,55	1,95
<b>3</b>	60,5	62,3	61,7	61,3	64,9	65,8	62,4	65,8	62,9	61,4	61,5	67,9	62,8	63,3	65,0	63,2	61,1	63,0	63,15	1,98
<b>4</b>	62,4	64,8	61,9	62,5	67,1	64,1	64,3	66,7	66,4	66,8	63,3	64,7	66,2	64,1	63,2	62,9	61,3	62,6	64,18	1,82
<b>5</b>	62,8	66,8	65,3	66,6	65,0	67,0	63,4	62,8	63,7	62,9	63,6	62,9	61,2	61,0	62,2	66,0	63,0	62,4	63,81	1,86
																			64,20	1,90

Πίνακας 3.12 Μετρήσεις σκληρότητας ανά σημείο/μοίρες στα κυάθια μονωτήρα GNS3-1 & GNS3-3 & GNS3-5

**GNP4-1**

μοίρες σημεία	0	15	30	60	75	90	105	120	165	180	195	210	240	255	270	285	300	345	Μ.Ο.	Τυπική Απόκλιση
1	72,9	73,0	74,8	76,7	75,5	75,3	74,4	75,9	75,5	74,3	73,0	75,1	72,4	76,1	74,9	75,7	74,1	75,6	74,68	1,23
2	73,0	73,6	73,8	74,7	75,3	74,7	73,7	74,7	74,7	77,2	77,1	76,8	76,9	76,7	76,5	76,7	73,8	72,4	75,28	1,56
3	74,1	76,4	74,3	76,3	75,3	75,2	76,5	76,4	76,5	75,5	75,2	75,6	75,9	74,4	72,8	73,8	73,1	72,6	75,13	1,30
4	74,1	76,4	76,3	75,3	74,9	75,2	78,4	78,5	75,1	74,9	77,3	78,3	74,2	76,0	75,0	75,2	74,4	73,8	75,85	1,50
5	72,6	72,3	74,0	75,9	75,7	75,1	73,6	75,8	75,3	75,1	76,4	74,9	75,7	76,4	76,6	75,6	75,1	76,6	75,06	1,27
6	74,0	73,1	73,9	74,8	75,1	74,7	75,0	73,6	73,2	75,1	75,3	75,8	76,2	75,3	76,0	76,9	75,4	75,2	74,90	1,03
7	73,7	74,1	73,8	76,1	74,2	74,8	75,1	77,1	75,1	74,2	74,5	74,2	74,5	74,0	75,9	75,2	74,6	75,8	74,77	0,91
																			75,10	1,26

Πίνακας 3.13 Μετρήσεις σκληρότητας ανά σημείο/μοίρες στα κιάθιο μονωτήρα GNP4-1

**GNP4-1 & GNP4-3**

μοίρες σημεία	0	15	30	60	75	90	105	120	165	180	195	210	240	255	270	285	300	345	Μ.Ο.	Τυπική Απόκλιση
<b>1</b>	70,3	70,3	69,7	68,6	71,7	70,4	73,0	73,1	70,2	70,1	68,0	70,8	69,2	71,4	69,9	71,4	68,0	68,2	70,23	1,52
<b>2</b>	71,0	71,9	72,0	70,3	69,7	68,6	71,1	73,1	68,0	68,8	68,4	71,7	70,9	72,9	73,0	73,2	71,9	72,0	71,02	1,70
<b>3</b>	73,8	69,3	70,7	69,5	69,3	68,7	69,6	73,9	70,6	70,7	71,2	69,3	69,7	69,8	70,3	71,1	71,9	74,1	70,75	1,67
<b>4</b>	70,2	70,4	69,6	69,8	69,9	68,0	71,1	68,9	68,8	71,6	73,5	72,1	69,3	73,0	71,8	71,0	70,2	74,7	70,77	1,75
<b>5</b>	72,3	67,1	72,1	68,9	69,3	71,2	70,5	69,3	70,9	73,3	70,4	69,3	73,4	71,1	68,9	69,0	71,5	73,5	70,66	1,81
<b>6</b>	67,0	69,7	69,9	68,8	69,3	68,8	69,4	69,5	69,8	69,3	73,0	71,9	72,0	72,0	73,3	72,1	73,5	72,1	70,63	1,86
<b>7</b>	69,8	70,0	68,9	69,2	69,0	66,1	70,5	70,1	71,1	72,9	71,4	70,5	70,6	70,5	71,0	73,5	72,8	72,2	70,56	1,73
																			70,66	1,72

Πίνακας 3.14 Μετρήσεις σκληρότητας ανά σημείο/μοίρες στα κύαθια μονωτήρα GNP4-1 & GNP4-3

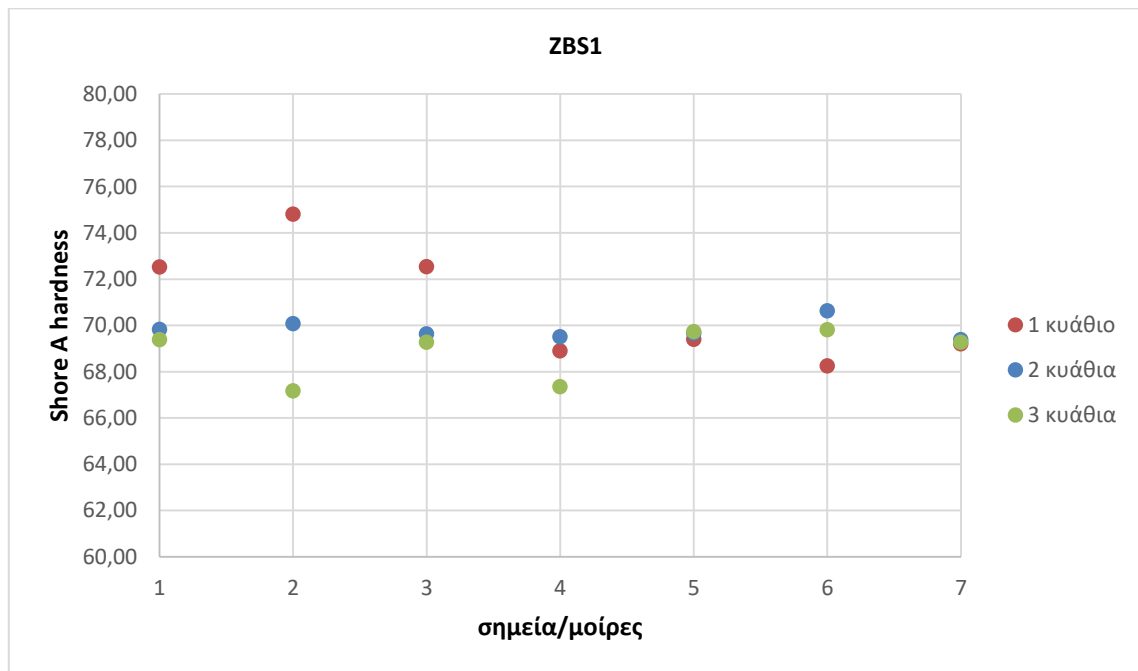
**GNP4-1 & GNP4-3 & GNP4-5**

μοίρες σημεία	0	15	30	60	75	90	105	120	165	180	195	210	240	255	270	285	300	345	Μ.Ο.	Τυπική Απόκλιση
<b>1</b>	66,4	67,8	68,9	69,2	68,9	66,1	66,8	70,1	69,3	69,3	71,5	71,0	70,6	69,8	70,9	70,0	69,3	71,3	69,28	1,62
<b>2</b>	67,8	66,4	64,2	65,4	67,3	64,1	64,3	66,7	66,3	66,8	70,1	69,3	68,2	69,0	68,9	68,8	68,1	67,3	67,16	1,81
<b>3</b>	69,0	68,1	67,7	69,3	67,9	67,2	68,4	65,8	70,1	71,0	72,3	69,6	67,0	71,5	70,9	69,0	72,3	68,4	69,19	1,85
<b>4</b>	66,3	66,8	69,1	65,2	67,1	64,1	64,3	66,7	66,4	66,8	69,1	69,3	68,2	69,0	68,9	69,8	68,1	67,1	67,35	1,71
<b>5</b>	66,1	66,8	65,3	66,6	69,2	67,0	68,9	69,2	70,5	72,9	71,6	71,7	71,2	72,1	71,9	72,6	70,6	71,0	69,73	2,43
<b>6</b>	69,7	68,2	66,4	67,4	68,8	67,1	67,4	68,2	69,8	71,3	73,0	73,1	72,2	72,7	72,1	72,7	66,8	70,3	69,84	2,38
<b>7</b>	69,0	68,1	67,7	69,5	67,9	68,4	68,4	65,8	70,1	69,9	70,7	69,6	67,0	72,4	70,9	73,9	71,0	69,1	69,41	1,94
																			68,85	1,96

Πίνακας 3.15 Μετρήσεις σκληρότητας ανά σημείο/μοίρες στα κυάθια καινούργιου μονωτήρα GNP4-1 & GNP4-3 & GNP4-5

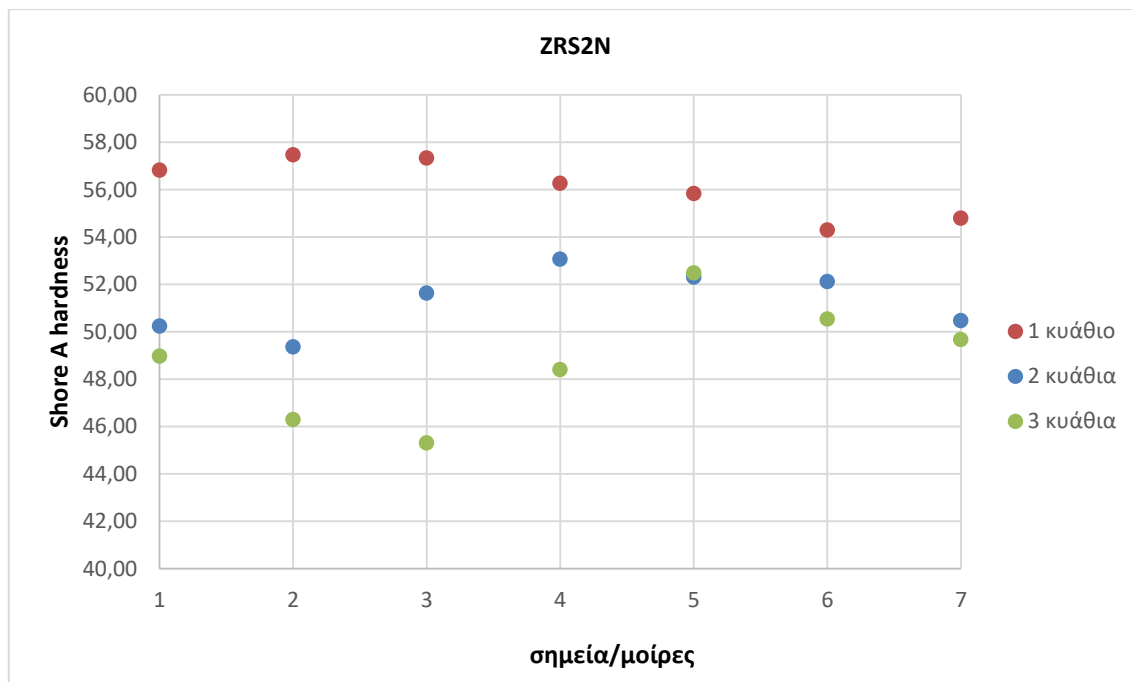


### 3.4 Γραφικές παραστάσεις



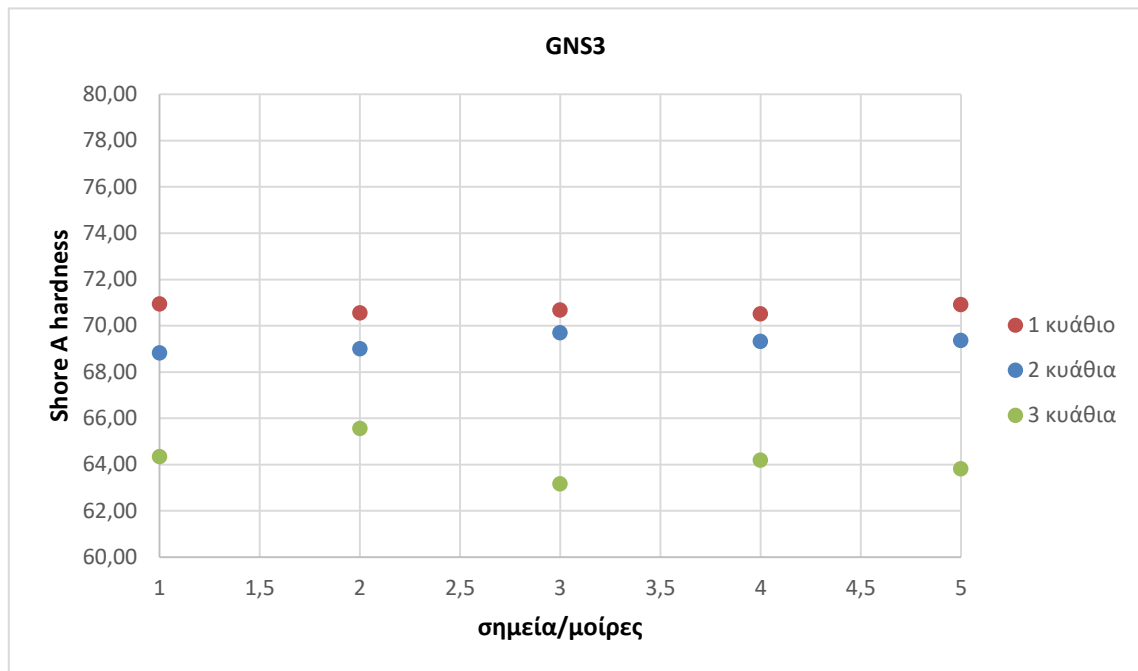
Σχήμα 3.1 Μέσος Όρος σκληρότητας μονωτήρα ZBS1 ανά σημείο/μείρες σε διαφορετικά επίπεδα κιαθίων

Ο μονωτήρας ZBS1 με 9 χρόνια λειτουργίας στο δίκτυο Μέσης Τάσης παρουσιάζει ένα μέσο όρο σκληρότητας 70,80 στις μέτρησεις με 1 κιάθιο, ένα μέσο όρο σκληρότητας 69,82 στις μέτρησεις με 2 κιάθια και ένα μέσο όρο σκληρότητας 68,86 στις μέτρησεις με 3 κιάθια. Στο σχήμα 3.1 που αναπαραστά γραφικά τον μέσο όρο σκληρότητας των μετρήσεων του μονωτήρα ZBS1 σε διαφορετικά σημεία/μείρες, παρατηρούμε ότι η προσθήκη κιαθίων στις μετρήσεις μειώνει την σκληρότητα των μονωτήρων, λόγω αύξησης του πάχους του δοκιμίου. Παρατηρούμε, επίσης, ότι στο σημείο 4 που αντιστοιχεί στο μέσο σημείο του κιαθίου, οι τιμές των μετρήσεων μας για όλους τους τρόπους τοποθέτησης των κιαθίων παρουσιάζουν την μικρότερη απόκλιση.



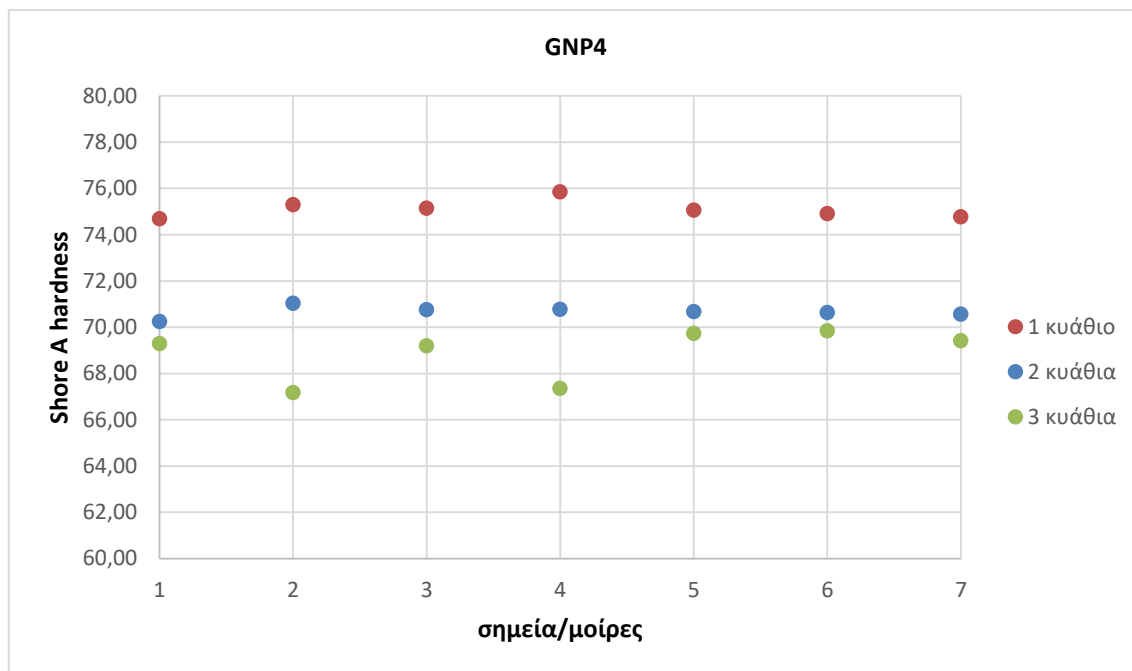
Σχήμα 3.2 Μέσος Όρος σκληρότητας μονωτήρα ZRS2N ανά σημείο/μίρες σε διαφορετικά επίπεδα κιαθίων

Ο μονωτήρας ZRS2N, ο οποίος δεν έχει λειτουργήσει στο δίκτυο Μέσης Τάσης Τάσης, παρουσιάζει ένα μέσο όρο σκληρότητας 56,12 στις μετρήσεις με 1 κιάθιο, ένα μέσο όρο σκληρότητας 51,32 στις μετρήσεις με 2 κιάθια και ένα μέσο όρο σκληρότητας 48,81 στις μετρήσεις με 3 κιάθια. Στο σχήμα 3.2 που αναπαριστά γραφικά τον μέσο όρο σκληρότητας των μετρήσεων του αχρησιμοποίητου μονωτήρα ZRS2N σε διαφορετικά σημεία/μίρες, παρατηρούμε, επίσης, ότι η προσθήκη κιαθίων στις μετρήσεις μειώνει την σκληρότητα των μονωτήρων, λόγω αύξησης του πάχους του δοκιμίου. Υπάρχει σχετικά μεγάλη απόκλιση στις τιμές των μετρήσεων με την προσθήκη κιαθίων που δικαιολογείται από την μικρότερη σκληρότητα του μονωτήρα λόγω μη χρησιμοποίησής του.



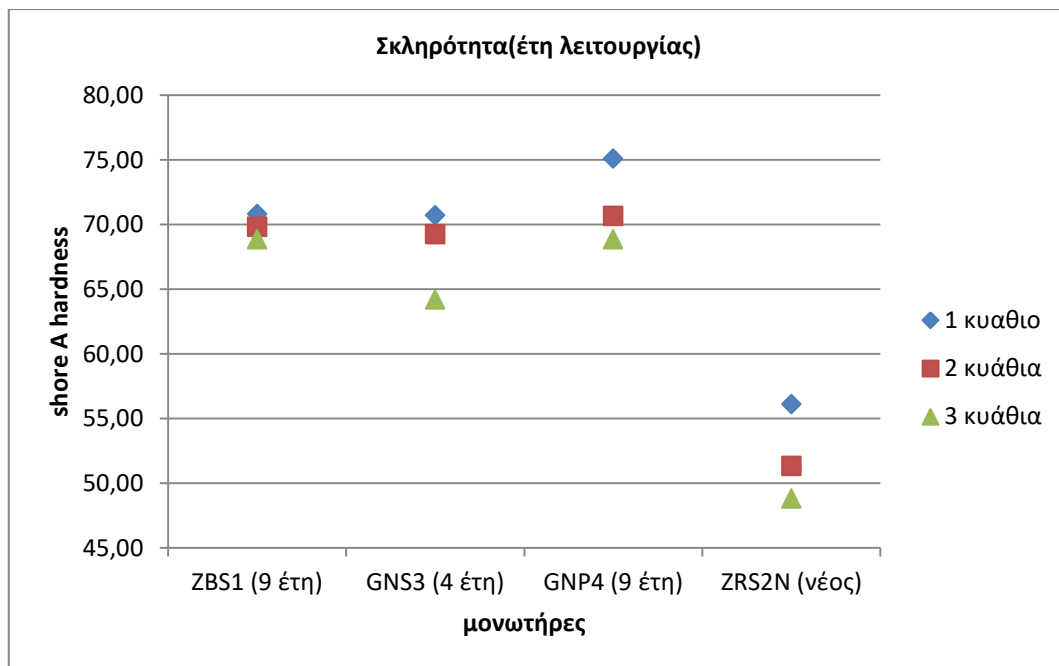
Σχήμα 3.3 Μέσος Όρος σκληρότητας μονωτήρα GNS3 ανά σημείο/μείρες σε διαφορετικά επίπεδα καθαθίων

Ο μονωτήρας GNS3, ο οποίος έχει λειτουργήσει 4 χρόνια στο δίκτυο Μέσης Τάσης, παρουσιάζει ένα μέσο όρο σκληρότητας 70,71 στις μετρήσεις με 1 κυάθιο, ένα μέσο όρο σκληρότητας 69,24 στις μετρήσεις με 2 κυάθια και τέλος ένα μέσο όρο σκληρότητας 64,21 στις μετρήσεις με 3 κυάθια. Στο σχήμα 3.3 που αναπαριστά γραφικά τον μέσο όρο σκληρότητας των μετρήσεων του μονωτήρα GNS3 σε διαφορετικά σημεία/μείρες, παρατηρούμε ότι η προσθήκη καθαθίων στις μετρήσεις μειώνει την σκληρότητα των μονωτήρων, λόγω αύξησης του πάχους του δοκιμίου. Οι μετρήσεις είναι πέντε (5) αφού η επιφάνεια μέτρησης του δοκιμίου του εν λόγω μονωτήρα (Εικόνα 3.10) είναι μικρότερη σε μέγεθος. Επίσης, είναι εμφανής η πολύ μικρή απόκλιση μεταξύ των μετρήσεων ενός (1) και δύο (2) κυαθίων, παρατήρηση που μπορεί να μας φανεί χρήσιμη στην διαδικασία σκληρομέτρησης.



Σχήμα 3.4 Μέσος Όρος σκληρότητας μονωτήρα GNP4 ανά σημείο/μοίρες σε διαφορετικά

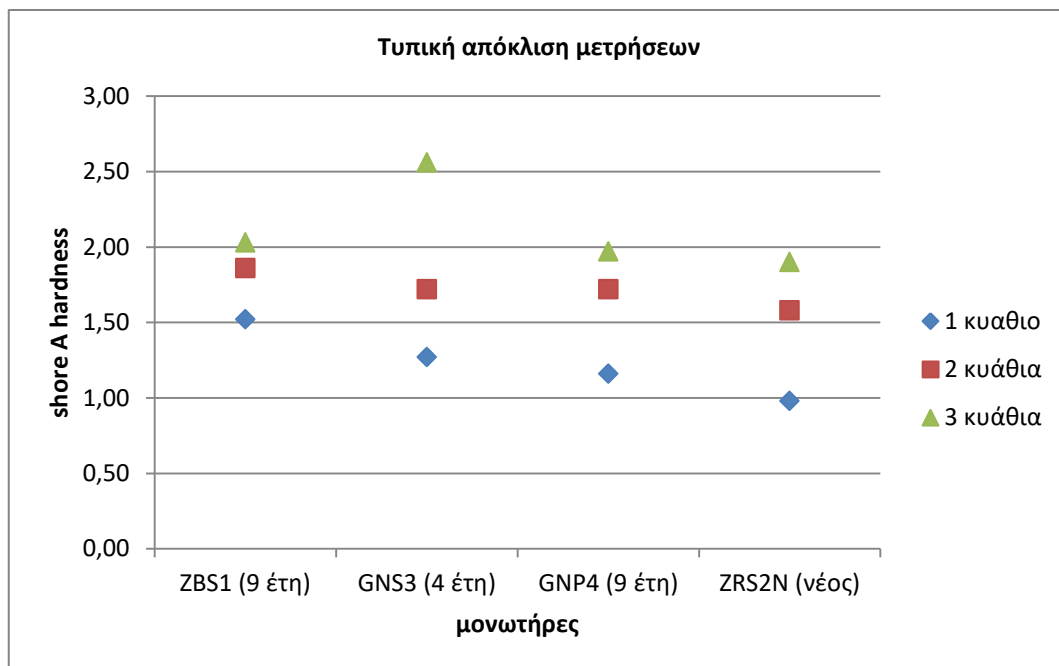
Ο μονωτήρας GNP4, ο οποίος έχει λειτουργήσει 10 χρόνια στο δίκτυο Μέσης Τάσης, παρουσιάζει ένα μέσο όρο σκληρότητας 75,10 στις μετρήσεις με 1 κιάθιο, ένα μέσο όρο σκληρότητας 70,66 στις μετρήσεις με 2 κιάθια και ένα μέσο όρο σκληρότητας 68,86 στις μετρήσεις με 3 κιάθια. Στο σχήμα 3.4 που αναπαριστά γραφικά τον μέσο όρο σκληρότητας των μετρήσεων του μονωτήρα GNP4 σε διαφορετικά σημεία/μοίρες, παρατηρούμε ότι η προσθήκη κιαθίων στις μετρήσεις μειώνει την σκληρότητα των μονωτήρων, λόγω αύξησης του πάχους του δοκιμίου. Επίσης, είναι εμφανής η σύγκλιση των τιμών σκληρότητας με τον μονωτήρα GNS3 (σχήμα 3.3), αφού προέρχονται από τον ίδιο κατασκευαστή που συνεπάγεται ίδιες διαδικασίες και ίδια σύνθετα υλικά ως πρώτη ύλη.



Σχήμα 3.5 Μ.Ο τιμών μετρήσεων σκληρότητας ανά κυάθιο μονωτήρα-Σε παρένθεση τα έτη λειτουργίας στο δίκτυο

Στο σχήμα 3.5 παρατηρούμε ότι η σκληρότητα shore A αυξάνει με τα χρόνια λειτουργίας των τριών συνθετικών μονωτήρων στο δίκτυο, ενώ ο αχρησιμοποίητος μονωτήρας παρουσιάζει τη μικρότερη σκληρότητα. Η διαπίστωση αυτή επιβεβαιώνεται από τις μετρήσεις σε όλα τα στρώματα κυαθίων παρ'όλο που η μέτρηση σκληρότητας στο ένα (1) κυάθιο ουσιαστικά δεν καλύπτει την απαίτηση του προτύπου για ελάχιστο πάχος δοκιμίου 6 mm [46].

Παρατηρούμε σημαντική διαφορά στην σκληρότητα, περίπου 20 μονάδες σκληρότητας shore A, μεταξύ ενός μονωτήρα που λειτούργησε στο δίκτυο για περίπου 10 χρόνια σε σχέση με ένα νέο. Θα πρέπει να επισημανουμε βεβαίως ότι είναι μονωτήρες διαφορετικού κατασκευαστή και η μεγάλη διαφορά ίσως να οφείλεται στις διαφορετικές διαδικασίες κατασκευής τους. Παρ'όλα αυτά η αύξηση της σκληρότητας επιβεβαιώνεται από τους δύο μονωτήρες GN, με τέσσερα και εννιά έτη λειτουργίας στο δίκτυο αντίστοιχα, που προέρχονται από τον ίδιο κατασκευαστικό οίκο άρα έχουν ακολουθηθεί ίδιες διαδικασίες κατασκευής και έχουν χρησιμοποιηθεί ίδια σύνθετα υλικά.



Σχήμα 3.6 Μεταβολή τυπικής αποκλίσης μετρήσεων με την προσθήκη κυαθίων

Στο σχήμα 3.6 παρατηρούμε ότι η προσθήκη κυαθίων αυξάνει την τυπική απόκλιση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων τους. Το αποτέλεσμα αυτό προκύπτει διότι με την προσθήκη κυαθίων ο διεισδυητής δεν συναντά μεγάλη αντίσταση και η επιφάνεια διείδυσης γίνεται πιο μαλακή αφού το πάχος του δοκιμίου αυξάνει, ενώ παράλληλα δυσκολεύει η διαδικασία της μέτρησης με αποτέλεσμα να υπάρχουν μεγαλύτερες αποκλίσεις. Η δυσκολία συναντάται διότι, όπως αναφέραμε και στην διαδικασία προετοιμασίας των κυαθίων στην Παράγραφο 3.2.1, οι στρώσεις των κυαθίων μετά την κοπή τους δεν εφαρμόζουν απόλυτα με αποτέλεσμα να δημιουργούνται αυξομειώσεις στην σκληρότητα κατά τις μετρήσεις. Παρατηρούμε επίσης ότι οι τυπικές αποκλίσεις των μετρήσεων με ένα (1) και δύο (2) κυαθία είναι πολύ μικρές, με αποτέλεσμα να μας επιτρέπεται η χρησιμοποίηση για τις μετρήσεις μας 1 (ενός) μόνο κυαθίου ώστε, να παραβλέψουμε τις μετρήσεις σκληρότητας σε δύο (2) κυαθία όπου συναντώνται οι προαναφερόμενες δυσκολίες.

#### 4. Συμπεράσματα και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

Στην εργασία αυτή εξετάστηκαν τρεις συνθετικοί μονωτήρες ανάρτησης και ένας συνθετικός μονωτήρες στήριξης (βλ. Πίνακας 4.1). Το περίβλημα των μονωτήρων ήταν κατασκευασμένο από SiR με προσμίξεις από το πληρωτικό υλικό aluminium - trihydrate (ATH). Από το σύνολο των μονωτήρων οι 3 ήταν σε λειτουργία στο Ελληνικό δίκτυο μέσης τάσης (με διαφορετικό χρόνο λειτουργίας κάθε μονωτήρας) σε συνθήκες υπαίθρου και σε παραθαλάσσιο περιβάλλον, ενώ ο ένας δεν είχε εγκατασταθεί και λειτουργήσει. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι οι συνθήκες αποθήκευσης του νέου μονωτήρα δεν ήταν οι ιδανικές κάτι που θα σχολιαστεί στις επόμενες παραγράφους.

Είναι σημαντικό το γεγονός ότι οι συνθετικοί μονωτήρες από την τοποθέτησή τους έως την αποξήλωσή τους από το δίκτυο λειτουργούσαν κανονικά χωρίς να παρουσιάσουν αστοχία. Οι μονωτήρες υποβλήθηκαν σε μέτρηση σκληρότητας για να αξιολογηθεί η κατάσταση του ελαστομερούς περιβλήματός τους.

Κωδική Ονομασία	Τύπος	Έτη Λειτουργίας
ZBS1	ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ	9
ZRS2N	ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ	-
GNS3	ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ	4
GNP4	ΣΤΗΡΙΞΗΣ	9

Πίνακας 4.1 Τύπος μονωτήρα και έτη λειτουργίας

- Από το σχήμα 3.5 προκύπτει ότι μέτρηση της σκληρότητας shore A είναι δείκτης της γήρανσης ενός συνθετικού μονωτήρα αφού μετά από χρόνια λειτουργίας των συνθετικών μονωτήρων στο δίκτυο, η σκληρότητα τους αυξήθηκε ενώ ο αχρησιμοποίητος μονωτήρας παρουσιάζει την μικρότερη σκληρότητα.
- Παρατηρούμε (Σχήμα 3.5) σημαντική διαφορά στην σκληρότητα, περίπου 20 μονάδες σκληρότητας shore A, μεταξύ ενός μονωτήρα που λειτούργησε στο δίκτυο για περίπου 10 χρόνια σε σχέση με ένα νέο. Θα πρέπει να επισημανουμε βεβαίως ότι, είναι μονωτήρες διαφορετικού κατασκευαστή και η μεγάλη διαφορά ίσως να οφείλεται στις διαφορετικές διαδικασίες κατασκευής τους.

Παρ'όλα αυτά η σχέση γήρανσης (τα έτη λειτουργίας στο δίκτυο) με την αύξηση της σκληρότητας επιβεβαιώνεται από τους μονωτήρες GN, που προέρχονται από τον ίδιο κατασκευαστικό οίκο άρα έχουν ακολουθηθεί ίδιες διαδικασίες κατασκευής και έχουν χρησιμοποιηθεί ίδια σύνθετα υλικά.

- Η προσθήκη κυαθίων στις μετρήσεις μειώνει τη σκληρότητα των μονωτήρων, λόγω αύξησης του πάχους του δοκιμίου ενώ αυξάνει παράλληλα και την τυπική απόκλιση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων τους.
- Οι μετρήσεις σκληρότητας σε 1 κυάθιο με τις μετρήσεις σε 2 κυάθια συγκλίνουν αφού ότι οι τυπικές αποκλίσεις των μετρήσεων είναι πολύ μικρές. Αυτό μας επιτρέπει τη χρησιμοποίηση 1 (ενός) μόνο κυαθίου για μετρήσεις σκληρότητας παραβλέποντας τις μετρήσεις σε 2 κυάθια όπου συναντώνται οι προαναφερόμενες δυσκολίες, παρ'όλο που η μέτρηση σκληρότητας στο 1 κυάθιο ουσιαστικά δεν καλύπτει την απαίτηση του προτύπου για ελάχιστο πάχος δοκιμίου 6 mm [46].
- Οι μετρήσεις σκληρότητας παρουσιάζουν την μικρότερη απόκλιση μετρήσεων, όταν αυτές πραγματοποιούνται στο μέσο των κυαθίων. Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα όταν θέλουμε να προχωρήσουμε σε μια γρήγορη δοκιμή σκληρότητας να εντοπίσουμε στο συγκεκριμένο σημείο.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική αναφορά [71], η σκληρότητα shore A σε καινούριους μονωτήρες στους οποίους δεν έχει υπεισέλθει γήρανση, αναμένεται να είναι μεταξύ των τιμών 65 και 75. Παρατηρούμε ότι ο νέος μονωτήρας ZRS2N παρουσιάζει αρκετά πιο χαμηλή σκληρότητα, περίπου 55 μονάδες σκληρότητας κατά Shore A. Επίσης, σύμφωνα με πρόσφατη μελέτη που προσδιόρισε την κλάση υδροφοβικότητας του εν λόγω μονωτήρα [57], όλα τα κυάθια τους ανήκουν στην κλάση υδροφοβικότητας 2.

Μετά το τέλος της έρευνας μου, επισκέφθηκα την Περιφερειακή Αποθήκη του ΔΕΔΔΗΕ Χαλκίδας, όπου διαπίστωσα και κατέγραψα τις συνθήκες αποθήκευσης των μονωτήρων που επικρατούν.





Εικόνα 4.1 Αποθήκευση συνθετικών μονωτήρων σε εξωτερικό χώρο στην ΠΑΧ ΔΕΔΔΗΕ



Εικόνα 4.2 Συσκευασία αποθήκευσης συνθετικών μονωτήρων σε εξωτερικό χώρο στην ΠΑΧ ΔΕΔΔΗΕ

Οι συνθήκες αποθήκευσης για τους συνθετικούς μονωτήρες είναι συγκεκριμένες και όταν τηρούνται βοηθούν τόσο στην απόδοσή τους όσο και στην επιμήκυνση του χρόνου ζωής τους [65]. Οι μονωτήρες πρέπει να αποθηκεύονται εσωτερικά ώστε να προστατεύονται από τις καιρικές συνθήκες και κατά προτίμηση να διατηρούνται αποθηκευμένοι στα πακέτα με τα οποία εισήλθαν στην αποθήκη. Τα τοιχώματα των κιβωτίων πρέπει να είναι συμπαγή για να αποτρέπεται η είσοδος τρωκτικών. Κανένα υλικό δεν πρέπει να τοποθετείται ή να αποθηκεύεται πάνω τους. Πρέπει να είναι αποθηκευμένοι σε καθαρή και ξηρή περιοχή, χωρίς λάδια ή παράγωγα πετρελαίου. Όταν στοιβάζονται, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε τα μεταλλικά μέρη τους

όπως οι ακροδέκτες να μην έρχονται σε επαφή με τα περιβλήματα των γειτονικών μονωτήρων. Ειδικά οι μονωτήρες με μακριά ράβδο (long rod insulators) πρέπει να τοποθετούνται σε πλαστικούς σωλήνες όταν είναι στοιβαγμένοι και τοποθετημένοι σε κατάλληλα σχεδιασμένα ράφια.[65].

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω οι συνθήκες αποθήκευσης των νέων συνθετικών μονωτήρων δεν είναι οι προβλεπόμενες [65], αφού όπως βλέπουμε από στην Εικόνα 4.2 οι μονωτήρες είναι εκτεθειμένοι στις καιρικές συνθήκες χωρίς να υπάρχει ένα υποτυπώδες προστατευτικό στέγαστρο, ενώ είναι προφανές από την Εικόνα 4.1 ότι τα κιβώτια αποθήκευσης δεν είναι συμπαγή, βρέθηκαν σε κακή κατάσταση (σπασμένα), ενώ κάποιες παρτίδες είναι χωρίς κάλυμμα.

Οι παραπάνω συνθήκες ίσως επηρεάζουν το μη αναμενόμενο αποτέλεσμα ως προς την κλάση υδροφοβικότητας και τη σκληρότητα, ενώ θα πρέπει να τονίσουμε ότι δεν υπάρχει συγκεκριμένο εύρος σκληρότητας ως προδιαγραφή στον ΔΕΔΔΗΕ για έναν νέο μονωτήρα.

Η μέτρηση της σκληρότητας συνθετικού μονωτήρα μπορεί να αποτελέσει έναν ενδεικτικό παράγοντα για την κατάσταση του συνθετικού μονωτήρα κατά την διαδικασία παραλαβής και δειγματοληπτικού ελέγχου, ο οποίος σε συνδυασμό με τους υπόλοιπους ελέγχους (οπτική επιθεώρηση, πυκνότητα, υδροφοβικότητα) μπορεί να οδηγήσει σε κάποια αρχικά συμπεράσματα.

## Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] Bollen M., Hassan F., Integration of distributed generation in the power system. IEEE Press, Piscataway, NJ, 2011.
- [2] Georgilakis P. S., Hatziargyriou N. D., “A review of power distribution planning in the modern power systems era: Models, methods and future research,” Electric Power Systems Research, Vol. 121, pp. 89–100, April 2015
- [3] Looms J. S. T., «Insulators for High Voltages», Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, 1990.
- [4] Mackevitch J., Shah M., «Polymer Outdoor Insulating Materials Part I: Comparison of Porcelain and Polymer Electrical Insulation», IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No. 3, May/June 2017
- [5] Σολδάτος Σ. 2017, Προσομοιώσεις δικτύων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας
- [6] Γιασαφάκης Κων. (2020/2021). Οπτική Επιθεώρηση, Δοκιμή υδροφοβικότητας και Μέτρηση Πυκνότητας σε Συνθετικούς Μονωτήρες Μέσης Τάσης, Διπλωματική εργασία ΕΜΠ.
- [7] Kikuchi T., Nishimura S., Nagao M., Izumi K., Y. Kubota and M. Sakata, «Survey on the Use of Non-ceramic Composite Insulators», IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 6 No. 5, 2014
- [8] Gorur R., Olsen B., Kroese A., Cook F., Kumar S.S., «Evaluation of critical components of nonceramic insulators in service: Role of defective interfaces», Final Project Report, Power Systems Engineering Research Center, PSERC Publication 04-32, 2004.
- [9] Zhao T., Comber M., «Calculation of electric field and potential distribution along non ceramic insulators considering the effects of conductors and transmission towers», IEEE Transactions on power delivery, Vol 15, No. 1, January 2000
- [10] Zhang Bo, Jinliang He, Xiang Cui, Shejiao Han, και Jun Zou, «Electric Field Calculation for HV Insulators on the Head of Transmission Tower by Coupling CSM With BEM», IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 42, No. 4, April 2006.
- [11] Eleperuma K., Saha T.K., Gillespie T., «Electric Field Modeling of Non Ceramic High Voltage Insulators», Australasian Universities Power Engineering Conference, Hobart, Tasmania, Australia, September 2005.

- [12] Sebestyén Imre, «Electric-Field Calculation for HV Insulators Using Domain Decomposition Method», IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 38, No. 2, March 2002
- [13] NGK INSULATORS, LTD., «NGKinsulators, LTD.» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ngk-insulators.com/en/info/division/electric/>. [Πρόσβαση 20 June 2021]
- [14] Σιδεράκης Κ., Πυλαρινός Δ., Θαλασσινάκης Ε., Βιττέλας Ι., Πυργιώτη Ε., Διερεύνηση της συμπεριφοράς συνθετικών μονωτήρων HTV SIR και κεραμικών μονωτήρων με επικάλυψη από RTV στον παράκτιο σταθμό δοκιμής μονωτήρων της ΔΕΗ/ΔΔΝ, CIGRE 2011, Αθήνα
- [15] Li S., L. Zhong and J. Li, et al: 'A Brief History and Research Progress on Solid Engineering Dielectrics in China', IEEE Electrical Insulation Magazine, 2010, 26, (6), pp. 14-21
- [16] [http://www.asia.ru/en/CompanyFullInfo/?company\\_id=69852](http://www.asia.ru/en/CompanyFullInfo/?company_id=69852) [Ηλεκτρονικό] [Πρόσβαση: 20 May 2021]
- [17] IEC 60815-1, «Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 1: Definitions, information and general principles,» 2008.
- [18] Γερασιμοπούλου Ελένη, Διπλωματική Εργασία, Επίδραση της θερμότητας με αγωγή, ακτινοβολία και μεταφορά στη διηλεκτρική αντοχή των μονωτήρων πορσελάνης, Οκτώβριος 2014.
- [19] Wang Jing, Stanislaw M. Gubanski, Jörgen Blennow, Sevil Atarijabarzadeh, Emma Strömberg, Sigbritt Karlsson, Influence of Biofilm Contamination on Electrical Performance of Silicone Rubber Based Composite Materials, May 22, 2012
- [20] Fernando M.A.R.M, S.M Gubanski, Ageing of Silicone Rubber Insulators in Coastal and Inland Tropical Environment, May 2009
- [21] Lei Q.: 'Recent Progress of Engineering Dielectrics'(Science Press, Beijing, 1999, 1st end.
- [22] Dinesh M.N., N. Vasudev, P.V. Vasudevan Nambudri, K. Suryanarayana, K.N.Ravi, V. Krishnan, Performance of composite insulators with and without bio contamination, Chongqing, China, November 9- 13, 2008.
- [23] Chrzan Krystian Leonard, Jean M. Andino, Ryszard Twarovski, Effects of acid rain on outdoor insulators, Przegląd Elektrotechniczny, 2001.
- [24] Khan Yasin, Degradation of High Voltage Polymeric Insulators in Arid Desert's Simulated Environmental Conditions, Department of Electrical Engineering, College of Engineering, King Saud University, Kingdom of Saudi Arabia, 2009

- [25] Papailiou O., Konstantin, Schmuck Frank, *Silicone Composite Insulators, Materials Design Applications*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013.
- [26] Mackevitch J., M. Shah, «Polymer Outdoor Insulating Materials Part I: Comparison of Porcelain and Polymer Electrical Insulation», *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 13, No. 3, May/June 2000, pp. 5-12.
- [27] Simmons S., Shah M., Mackevich J., Chang R.J., «Polymer Outdoor Insulating Materials Part III – Silicone Elastomer Considerations», *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 13, No. 5, September/October 1997
- [28] Makkonen Lasse, Jian Zhang, Timo Karlsson, Mikko Tiihonen, *Modelling the growth of large rime ice accretions*, 17 March 2018
- [29] Σιδεράκης Γ. Κ., Διδακτορική Διατριβή, Διερεύνηση της συμπεριφοράς μονωτήρων πορσελάνης και υλικών RTV SIR, Δεκέμβριος 2006
- [30] Jianlin Hu, Caixin Sun, Xingliang Jiang, Daibo Xiao, Zhijin Zhang, Lichun Shu, *DC Flashover Performance of Various Types of Ice-Covered Insulator Strings under Low Air Pressure*, State Key Laboratory of Power Transmission Equipments & System Security and New Technology, College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing, China, May 2012
- [31] Revankar, Γ. (2003). "Εισαγωγή στη δοκιμή σκληρότητας." *Μηχανική δοκιμή και αξιολόγηση*, ASM σε απευθείας Σύνδεση Vol. 8.
- [32] yanneng power technology, [Ηλεκτρονικό]. Available: [www.yn-electric.com](http://www.yn-electric.com) [Πρόσβαση 27 March 2021]
- [33] ISO 27-81, «Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of density, Ed. 5.0,» 2018.
- [34] Fisher Scientific, «[www.fishersci.com](http://www.fishersci.com),» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.fishersci.com/us/en/home.html>. [Πρόσβαση 06 July 2021].
- [35] IEC TS 62073, «Guidance on the measurement of hydrophobicity of insulator surfaces, Ed. 2.0,» 2016.
- [36] Chinn, R. L. (2009). «Hardness, bearings, and the Rockwells». *Advanced Materials & Processes* 167 (10): 29–31.
- [37] Dieter, George E. (1989). *Μηχανική Μεταλλουργία*. SI Μετρική Προσαρμογή. Maidenhead, ηνωμένο βασίλειο: McGraw-Hill Education.
- [38] Malzbender, J (2003). «Comment on hardness definitions». *Journal of the European Ceramics Society* 23: 9.

- [39] [https://en.wikipedia.org/wiki/Rockwell\\_scale](https://en.wikipedia.org/wiki/Rockwell_scale) [Ηλεκτρονικό]. [Πρόσβαση 18 June 2021].
- [40] Ασημακόπουλος Α. Πειραματική αντοχή των υλικών-Σκληρομετρήσεις, Σέρρες 2019, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Α.Τ.Ε.Ι. Σερρών
- [41] Mix A. W. and Giacomini A. J. (2011), Standardized Polymer Durometry, *Journal of Testing and Evaluation*, 39(4), pp. 1–10.
- [42] [https://en.wikipedia.org/wiki/Leeb\\_rebound\\_hardness\\_test](https://en.wikipedia.org/wiki/Leeb_rebound_hardness_test) [Ηλεκτρονικό]. Πρόσβαση: 11 June 2021
- [43] Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Shore\\_durometer](https://en.wikipedia.org/wiki/Shore_durometer) Ηλεκτρονικό: [Πρόσβαση 21 May 2021].
- [44] ASTM D2240-15, Standard test method for rubber property- Durometer hardness, 2015.
- [45] ISO 868:2003 Plastics and ebonite — Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness)
- [46] International Standard ISO 48-4 Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of hardness Part 4: Indentation hardness by durometer method (Shore hardness) First edition 2018-08-31
- [47] Callister W. D., *Materials Science and Engineering* 7th ed., John Wiley & Sons, 2007
- [48] Ανδριανόπουλος Ν., Κυριαζή Ε., Λιακόπουλος Κ., Πειραματική Αντοχή των Υλικών, Αθήνα 1988
- [49] Vian, Wei Dai and Denton, Nancy L., "Hardness Comparison of Polymer Specimens Produced with Different Processes" (2018). ASEE IL-IN Section Conference. 3
- [50] Ghosh Dipankar., Khastgir Dipak, Degradation and Stability of Polymeric High-Voltage Insulators and Prediction of Their Service Life through Environmental and Accelerated Aging Processes, *ACS Omega* 2018, 3, 9, 11317–11330
- [51] Frank Schmuck, Shaun Aitken, A Proposal for Intensified Inspection and Acceptance Tests of Composite Insulators as an Addition to the Guidelines of IEC 61109 Ed. 2: 2008 and IEC 61952 Ed. 2: 2008
- [52] ISO 48-7:2018 Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of hardness — Part 7: Apparent hardness of rubber-covered rollers by Shore-type durometer method

- [53] ISO 23529:2016 Rubber — General procedures for preparing and conditioning test pieces for physical test methods
- [54] ISO 48-9:2018 Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of hardness — Part 9: Calibration and verification of hardness testers
- [55] Δημόσια Επιχείριση Ηλεκτρισμού, Τεχνική Περιγραφή ΔΕΗ ΔΔ - 204/20.11.2008 - Συνθετικοί μονωτήρες ανάρτησης και στήριξης, Αθήνα, 2008.
- [56] Μετεωρολογικός σταθμός Παλαιοκούνδουρας Μάνδρας Αττικής, «meteo.gr,» Ιδιοκτησία: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://penteli.meteo.gr/stations/mandra/> [Πρόσβαση 16 March 2021].
- [57] Μετεωρολογικός σταθμός Κύμης Ευβοίας, «meteo.gr,» Ιδιοκτησία: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://penteli.meteo.gr/stations/kymi/> [Πρόσβαση 22 June 2021].
- [58] Kakani S. L. (2005). Electronics Theory and Applications. New Age International. p. 7. ISBN 978-81-224-1536-0.
- [59] Joyce, K., Qi, H. J., Boyce, M. C. (2003), Durometer hardness and the stress-strain behavior of elastomeric materials, Rubber Chemistry and Technology, 76(2), pp. 419–435.
- [60] Kokkinaki O., A. Klini, N. Mavrikakis, K. Siderakis, E. Koudoumas, D. Pylarinos, E. Thalassinakis, C. Kalpouzou, D. Anglos, Assessing the type and operational quality of SIR HTV HV insulators by remote LIBS analysis, Crete, Greece, 2011.
- [61] Kamarudin N. et al. (2020) Hardness and Water Absorption Properties of Silicone Rubber Based Composites for High Voltage Insulator Applications. In: Jamaludin Z., Ali Mokhtar M. (eds) Intelligent Manufacturing and Mechatronics. SympoSIMM 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore
- [62] Cherney E.A.. Non-ceramic insulators a simple design that requires careful analysis. IEEE Electrical Insulation Magazine, May/June 1996.
- [63] Dowling N. E., Mechanical Behavior of Materials 2nd ed., Prentice Hall, New Jersey 1999
- [64] C.C.A.Kokalis, V.T.Kontargyri, I.F.Gonos, K.O.Papailiou, A.Anagnostou, M. Champakis, "Intensified quality assurance tests on medium voltage

composite insulators," Cigre Working Group, p. 11, 26 November 2020.

[65] Muhammad AMIN, Muhammad AKBAR & Muhammad SALMAN,  
“Composite insulators and their aging: An overview” , Science in China Series E:  
Technological Sciences ,2007

[69] Bakshi, M (2007). Electrical Power Transmission and Distribution.  
Technical Publications

[70] Bareiss Prüfgerätebau GmbH, «Digital Hardness tester HPE III,» 2020.  
[Ηλεκτρονικό]. Available: file:///C:/Users/user/AppData/Local/Temp/mapra-  
bareiss-hpe-iii-shore-a-d.pdf.

[71] Παπαηλιού Κ., « Τα μυστικά των συνθετικών μονωτήρων σιλικόνης» Cigre  
Working Group, Αθήνα 2007



## Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1.1 Το σύστημα παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας [2].....	9
Εικόνα 1.2 Εναέρια γραμμή μεταφοράς [5].....	10
Εικόνα 1.3 Μονωτήρες που χρησιμοποιούνταν σε δίκτυα τηλεγράφων και στη μεταφορά Η.Ε. [3].....	11
Εικόνα 1.4 Μονωτήρας τύπου «Helwett» [12] .....	13
Εικόνα 1.5 Μονωτήρας τύπου Pin ( Pin insulators) [13] .....	15
Εικόνα 1.6 Μονωτήρας τύπου cap and pin [16] .....	17
Εικόνα 1.7 Πορσελάνινος μονωτήρας ανάρτησης τύπου μεγάλου μήκους [20] .....	18
Εικόνα 1.8. Γυάλινος μονωτήρας ανάρτησης cap & pin [16] .....	23
Εικόνα 1.9 Μονωτήρες διέλευσης από πορσελάνη [22] .....	25
Εικόνα 1.10. Τομή σε μοντέλο συνθετικού μονωτήρα όπου διακρίνονται το κέλυφος, ο πυρήνας και οι μεταλλικές απολήξεις [29] .....	27
Εικόνα 1.11 Διάφορα σχέδια συνθετικών μονωτήρων (αριστερά)- μεταλλικός ακροδέκτης (δεξιά) συνθετικού μονωτήρα [32] .....	31
Εικόνα 2.1. Κενά στο ελαστομερές περίβλημα συνθετικού μονωτήρα [25] .....	34
Εικόνα 2.2. Έλλειψη σύνδεσης στα ακροκιβώτια συνθετικού μονωτήρα [25] .....	35
Εικόνα 2.3.Κοπή τετραγώνων στο συνθετικό περίβλημα [25] .....	35
Εικόνα 2.4. Τράβηγμα τετραγώνων με την βοήθεια πένσας [25] .....	35
Εικόνα 2.5. Παράδειγμα καλής συγκόλλησης [25] .....	36
Εικόνα 2.6. Σύγχρονη ζυγαριά ακριβείας [34] .....	37
Εικόνα 2.7. Δοκίμια που έχουν αντέξει τα 4.5kV για 6hrs [61] .....	38
Εικόνα 2.8. Δοκίμια από SLR ολοχερώς κατεστραμμένα έπειτα από 6hrs [61] .....	38
Εικόνα 2.9 Προετοιμασία δυναμικού τεστ πτώσης [25] .....	39
Εικόνα 2.10 Μέθοδος Brinelli [31] .....	41
Εικόνα 2.11 Μέθοδος Vickers [31] .....	42
Εικόνα 2.12 Μέθοδος Rockwell [31] .....	43

Εικόνα 2.13 Γράφημα Απεικόνισης της μεθόδου Leeb .....	44
Εικόνα 2.14 Διαστάσεις διεισδυτών τύπου A και D [44] .....	45
Εικόνα 2.15 Οι διεισδυτές για τα σκληρόμετρα κατά Shore A και Shore D [46] .....	46
Εικόνα 2.16. Αρχή λειτουργίας σκληρόμετρου με τη μέθοδο Shore [31] .....	47
Εικόνα 2.17-Διεισδυτής για σκληρόμετρα τύπου A (διαστάσεις σε mm) [46] .....	55
Εικόνα 2.18-Διεισδυτής για σκληρόμετρα τύπου D(διαστάσεις σε mm) [46] .....	55
Εικόνα 2.19-Διεισδυτής για σκληρόμετρα τύπου AO(διαστάσεις σε mm) [46] .....	56
Εικόνα 3.1 Οι μονωτήρες στους οποίους πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις .....	64
Εικόνα 3.2 Επεξήγηση κωδικοποίηση ονομασίας των μονωτήρων .....	67
Εικόνα 3.3 Αφαιρούμενα κυάθια και εργαλεία/όργανα που χρησιμοποιήθηκαν .....	68
Εικόνα 3.4 Προετοιμασία μονωτήρα ZBS1 τύπου ανάρτησης (ball & socket) με περίβλημα ελαστομερούς σιλικόνης .....	69
Εικόνα 3.5 Προετοιμασία μονωτήρα ZRS2N τύπου ανάρτησης (ball & socket) με περίβλημα ελαστομερούς σιλικόνης .....	70
Εικόνα 3.6 Προετοιμασία μονωτήρων GNS3 και GNP 4 με περίβλημα ελαστομερούς σιλικόνης .....	70
Εικόνα 3.7 Ηλεκτρονικός μετρητής σκληρότητας της εταιρίας Bareiss [70] .....	71
Εικόνα 3.8 Μέτρηση σκληρότητας σε 1 κυάθιο μονωτήρων τύπου ανάρτησης (ball & socket) με περίβλημα ελαστομερούς σιλικόνης .....	71
Εικόνα 3.9 Μέτρηση σκληρότητας σε 2 κυάθια μονωτήρων τύπου ανάρτησης (ball & socket) με περίβλημα ελαστομερούς σιλικόνης .....	72
Εικόνα 3.10 Μέτρηση σκληρότητας σε 3 κυάθια μονωτήρων τύπου ανάρτησης (ball & socket) με περίβλημα ελαστομερούς σιλικόνης .....	72
Εικόνα 4.1 Αποθήκευση συνθετικών μονωτήρων σε εξωτερικό χώρο στην ΠΑΧ ΔΕΔΔΗΕ .....	93
Εικόνα 4.2 Συσκευασία αποθήκευσης συνθετικών μονωτήρων σε εξωτερικό χώρο στην ΠΑΧ ΔΕΔΔΗΕ .....	93

## **Πίνακας Σχημάτων – Πινάκων**

Σχήμα 1.1 Κατηγοριοποίηση Μονωτήρων Υψηλών Τάσεων. [18] .....	21
Πίνακας 1.1 Ηλεκτρικές ιδιότητες της πυριτικής πορσελάνης, της αργιλικής πορσελάνης και του γυαλιού [29] .....	25
Πίνακας 2.1 Μέθοδοι σκληρομέτρησης ανά υλικό [46] .....	48
Πίνακας 2.2 Ομαδοποίηση προτύπων σκληρότητας [46] .....	52
Πίνακας 2.3 Βαθμονόμηση δύναμης ελατηρίου σκληρόμετρου [46] .....	59
Πίνακας 3.1 Τεχνικές προδιαγραφές (ΔΕΗ) συνθετικών μονωτήρων δικτύου διανομής ΗΕ [55] .....	65
Πίνακας 3.2 Περιβαλλοντικές συνθήκες υπό τις οποίες οι μονωτήρες λειτουργούν βάσει τεχνικής προδιαγραφής ΔΕΗ [55] .....	66
Πίνακας 3.3 Στοιχεία συνθετικών μονωτήρων .....	68
Πίνακας 3.4 Μετρήσεις σκληρότητας ανά σημείο/μοίρες στο κιάθιο μονωτήρα ZBS1-7 .....	73
Πίνακας 3.5 Μετρήσεις σκληρότητας ανά σημείο/μοίρες στο κιάθιο 7 του μονωτήρα ZBS1 το οποίο τοποθετήθηκε πάνω στο κιάθιο 5 του μονωτήρα ZBS1 για αύξηση του πάχους του δοκιμίου .....	74
Πίνακας 3.6 Μετρήσεις σκληρότητας ανά σημείο/μοίρες στα κιάθια μονωτήρα ZBS1-7 , ZBS1-5 και ZBS1-3 .....	75
Πίνακας 3.7 Μετρήσεις σκληρότητας ανά σημείο/μοίρες στο κιάθιο καινούργιου μονωτήρα ZRS9N-7 .....	76
Πίνακας 3.8 Μετρήσεις σκληρότητας ανά σημείο/μοίρες στα κιάθια καινούργιου μονωτήρα ZRS9N-7 & ZRS9N-5.....	77
Πίνακας 3.9 Μετρήσεις σκληρότητας ανά σημείο/μοίρες στα κιάθια καινούργιου μονωτήρα ZRS9N-7 & ZRS9N-5 & ZRS9N-3.....	78
Πίνακας 3.10 Μετρήσεις σκληρότητας ανά σημείο/μοίρες στο κιάθιο μονωτήρα GNS3-1 .....	79
Πίνακας 3.11 Μετρήσεις σκληρότητας ανά σημείο/μοίρες στα κιάθια μονωτήρα GNS3-1 & GNS3-3.....	80
Πίνακας 3.12 Μετρήσεις σκληρότητας ανά σημείο/μοίρες στα κιάθια μονωτήρα GNS3-1 & GNS3-3 & GNS3-5.....	81

Πίνακας 3.13 Μετρήσεις σκληρότητας ανά σημείο/μοίρες στα κιάθια μονωτήρα GNP4-1.....	82
Πίνακας 3.14 Μετρήσεις σκληρότητας ανά σημείο/μοίρες στα κιάθια μονωτήρα GNP4-1 & GNP4-3.....	83
Πίνακας 3.15 Μετρήσεις σκληρότητας ανά σημείο/μοίρες στα κιάθια καινούργιου μονωτήρα GNP4-1 & GNP4-3 & GNP4-5.....	84
Σχήμα 3.1 Μέσος Όρος σκληρότητας μονωτήρα ZBS1 ανά σημείο/μοίρες σε διαφορετικά επίπεδα κιαθίων .....	85
Σχήμα 3.2 Μέσος Όρος σκληρότητας μονωτήρα ZRS2N ανά σημείο/μοίρες σε διαφορετικά επίπεδα κιαθίων.....	86
Σχήμα 3.3 Μέσος Όρος σκληρότητας μονωτήρα GNS3 ανά σημείο/μοίρες σε διαφορετικά επίπεδα κιαθίων.....	87
Σχήμα 3.4 Μέσος Όρος σκληρότητας μονωτήρα GNP4 ανά σημείο/μοίρες σε διαφορετικά .....	88
Σχήμα 3.5 Μ.Ο τιμών μετρήσεων σκληρότητας ανά κιάθιο μονωτήρα-Σε παρένθεση τα έτη λειτουργίας στο δίκτυο.....	89
Σχήμα 3.6 Μεταβολή τυπικής αποκλίσης μετρήσεων με την προσθήκη κιαθίων.....	90
Πίνακας 4.1 Τύπος μονωτήρα και έτη λειτουργίας.....	91