



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ &
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Οπτική Επιθεώρηση, Δοκιμή Υδροφοβικότητας &
Μέτρηση Πυκνότητας σε Συνθετικούς Μονωτήρες
Μέσης Τάσης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Δ. Γιασαφάκης

Καθηγητής : Ιωάννης Φ. Γκόνος

Επιβλέποντες : Βασιλική Θ. Κονταργύρη

Χρήστος - Χριστόδουλος Αθ. Κοκάλης

Αθήνα, Μάρτιος 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ &
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Οπτική Επιθεώρηση, Δοκιμή Υδροφοβικότητας &
Μέτρηση Πυκνότητας σε Συνθετικούς Μονωτήρες
Μέσης Τάσης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Δ. Γιασαφάκης

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 22^η Μαρτίου 2021.

Αθήνα, Μάρτιος 2021

.....

Ιωάννης Φ. Γκόνος
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Πάυλος Σ. Γεωργιλιάκης
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Κωνσταντίνος Δ. Γιασαφάκης

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

Copyright © Κωνσταντίνος Δ. Γιασαφάκης, 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 δοκιμή πυκνότητας σε οκτώ συνθετικούς μονωτήρες μέσης τάσης. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε οπτική επιθεώρηση καθώς και μετρήσεις υδροφοβικότητας και πυκνότητας στο ελαστομερές περίβλημα σιλικόνης, δύο νέων και έξι φυσικά γηρασμένων συνθετικών μονωτήρων στήριξης και ανάρτησης, τεσσάρων διαφορετικών κατασκευαστών, οι οποίοι ήταν εγκατεστημένοι στο Ελληνικό Δίκτυο Διανομής.

Αρχικά, γίνεται οπτική επιθεώρηση των μονωτήρων όπου εξετάζεται η μορφολογική τους κατάσταση καθώς και μετρήσεις υδροφοβικότητας με διαβροχή της επιφάνειας του πολυμερικού τους περιβλήματος. Έπειτα, δοκίμια από το περίβλημα κάθε μονωτήρα υποβάλλονται σε μέτρηση πυκνότητας με τη μέθοδο Β του προτύπου ISO 27-81:2018. Τέλος, πραγματοποιείται συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων των μετρήσεων με παράλληλη εξαγωγή συμπερασμάτων.

Λέξεις κλειδιά: Συνθετικοί μονωτήρες, πυκνότητα, ελαστομερή, υδροφοβικότητα, οπτική επιθεώρηση, ελαστομερές περίβλημα, silicone rubber

Abstract

Subject of this diploma thesis is to examine the density of eight composite medium voltage insulators. More specifically, visual inspection was performed as well as measurements of hydrophobicity and density in the elastomeric silicone housing, of two new and six naturally aged composite, post and suspension insulators, by four different manufacturers, which were installed in the Greek Distribution Network.

Initially, the insulators were visually inspected where their morphological condition was evaluated as well as measurements of hydrophobicity by wetting the surface of their polymeric housing. Then, specimens from the housing of each insulator were subjected to density measurement by method B of the standard ISO 27-81: 2018. Finally, a comparative study of the results of the measurements is carried out while drawing conclusions.

Key words: Composite insulators, density, elastomers, hydrophobicity, visual inspection, insulating housing, silicone rubber

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 Γεράσιμο Μίγκα, εργοδηγό Περ. Φιλοθέης-Κηφισιάς του ΔΕΔΔΗΕ και Κωνσταντίνο Λέζο, εργοδηγό Περ. Ελευσίνας του ΔΕΔΔΗΕ για 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	4
Περιεχόμενα.....	5
Πρόλογος.....	7
1 Εισαγωγή	9
1.1 Οι μονωτήρες στα Δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	9
1.1.1 Ιστορική αναδρομή	9
1.2 Κατηγορίες μονωτήρων.....	11
1.3 Μονωτικά υλικά των μονωτήρων	14
1.3.1 Κεραμικοί μονωτήρες	15
1.3.2 Συνθετικοί μονωτήρες	20
2 Τεχνικά θέματα συνθετικών μονωτήρων	29
2.1 Καταπονήσεις στους υπαίθριους μονωτήρες.....	29
2.1.1 Μηχανισμοί γήρανσης των συνθετικών μονωτήρων	31
2.2 Ρύπανση των μονωτήρων	34
2.3 Υδροφοβικότητα	38
2.3.1 Η υδροφοβικότητα στους συνθετικούς μονωτήρες μέσης τάσης.....	39
2.4 Μάζα και Πυκνότητα.....	41
2.4.1 Ομογενοποίηση	43
2.4.2 Πυκνότητα του νερού	44
3 Δοκιμές και μετρήσεις στους μονωτήρες.....	47
3.1 Προσδιορισμός της κλάσης της υδροφοβικότητας	51
3.1.1 Μέτρηση της υδροφοβικότητας βάσει του IEC/TS 62073.....	51
3.2 Μέτρηση πυκνότητας.	58
3.2.1 Μέθοδος Α	59
3.2.2 Μέθοδος Β	61
3.2.3 Τριχοειδή φαινόμενα.....	63
4 Εργαστηριακές Δοκιμές	64
4.1 Οι μονωτήρες.....	64
4.1.1 Προδιαγραφές	65
4.1.2 Γεωγραφικά χαρακτηριστικά	67
4.1.3 Κωδικοποίηση.....	68

4.2	Οπτική επιθεώρηση & δοκιμή υδροφοβικότητας.....	69
4.2.1	Μονωτήρας ανάρτησης της εταιρείας ZB με αύξοντα αριθμό 1.....	70
4.2.2	Μονωτήρας ανάρτησης της εταιρείας ZB με αύξοντα αριθμό 2.....	74
4.2.3	Μονωτήρας στήριξης της εταιρείας ET με αύξοντα αριθμό 3	78
4.2.4	Μονωτήρας στήριξης της εταιρείας GN με αύξοντα αριθμό 4	82
4.2.5	Μονωτήρας στήριξης της εταιρείας GN με αύξοντα αριθμό 5	86
4.2.6	Μονωτήρας στήριξης της εταιρείας ZR με αύξοντα αριθμό 6	90
4.2.7	Μονωτήρες ανάρτησης με αύξοντα αριθμό 7 & στήριξης με αύξοντα αριθμό 8 της εταιρείας ZR.....	94
4.3	Μετρήσεις Πυκνότητας	99
4.3.1	Προετοιμασία των δοκιμίων.....	99
4.3.2	Ζυγός ακριβείας	101
4.3.3	Διαδικασία των μετρήσεων	102
4.3.4	Αποτελέσματα μετρήσεων.....	104
4.4	Συμπεράσματα.....	115
	Βιβλιογραφία	121
	Πίνακας Εικόνων	129
	Πίνακας Σχημάτων	132

Πρόλογος

Στην εργασία αυτή εξετάστηκαν πέντε συνθετικοί μονωτήρες στήριξης και τρεις συνθετικοί μονωτήρες ανάρτησης. Από το σύνολο των μονωτήρων οι έξι ήταν σε λειτουργία στο δίκτυο μέσης τάσης (με διαφορετικό χρόνο λειτουργίας κάθε ένας) σε συνθήκες υπαίθρου, ενώ οι υπόλοιποι δύο δεν είχαν 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 καταπονήσεις που δέχονται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους και για τους μηχανισμούς γήρανσης του πολυμερικού τους περιβλήματος. Αναλύονται δύο μεγάλα ζητήματα σχετικά με τους συνθετικούς μονωτήρες: η ρύπανση και η υδροφοβικότητα του περιβλήματος σιλικόνης. Στην τελευταία ενότητα, αναφέρονται η μάζα και η πυκνότητα καθώς και η τρόποι ομογενοποίησης των μειγμάτων των ελαστομερών.

Στο τρίτο κεφάλαιο καταγράφεται ο τρόπος προσδιορισμού της υδροφοβικότητας βάσει του IEC/TS 62073 αλλά και οι μέθοδοι Α και Β για τη μέτρηση της πυκνότητας βάσει του προτύπου ISO 27-81: 2018.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται οι εργαστηριακές δοκιμές οι οποίες διεξήχθησαν στο χώρο του εργαστηρίου υψηλών τάσεων και ηλεκτρικών μετρήσεων του Ε.Μ.Π. στους συνθετικούς μονωτήρες μέσης τάσης. Αρχικά, αναφέρονται οι προδιαγραφές βάσει των οποίων κατασκευάστηκαν και τοποθετήθηκαν στο δίκτυο, κατόπιν περιγράφονται τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά και οι κλιματολογικές συνθήκες της τοποθεσίας εγκατάστασης τους και τέλος αναλύεται η κωδικοποίηση η οποία τους δόθηκε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία αλλά και τα αποτελέσματα της οπτικής επιθεώρησης και της δοκιμής υδροφοβικότητας στην οποία υποβλήθηκαν ένας προς έναν. Στην επόμενη ενότητα του κεφαλαίου γίνεται περιγραφή της διαδικασίας μέτρησης της πυκνότητας με τη μέθοδο Β του προτύπου ISO 27-81:2018, με παράλληλη περιγραφή του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε, και παρατίθενται τα

αποτελέσματα των μετρήσεων καθώς και οι γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν απ' αυτά.

Τέλος στην ενότητα 4.4 πραγματοποιείται συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων των μετρήσεων με παράλληλη εξαγωγή συμπερασμάτων.

1 Εισαγωγή

1.1 Οι μονωτήρες στα Δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η ανάγκη μεταφοράς και διανομής μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ κέντρων παραγωγής και κατανάλωσης, με χαμηλό κόστος, οδήγησε στη χρησιμοποίηση και επικράτηση υψηλών τάσεων της τάξης των 20, 22, 66 και 150kV. Ο εξοπλισμός μέσω του οποίου μεταφέρεται και διανέμεται η ηλεκτρική ενέργεια είναι οι γραμμές υψηλής και μέσης τάσης αντίστοιχα: πυλώνες, στύλοι και γυμνοί αγωγοί με κύριο μονωτικό μέσο τον ατμοσφαιρικό αέρα. 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 [1].

Οι μονωτήρες εξασφαλίζουν τη διαμόρφωση των απαραίτητων αποστάσεων, αναλαμβάνοντας τη στήριξη ή την ανάρτηση των αγωγών υψηλής τάσης [2]. 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 επί το πλείστον 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 [3].

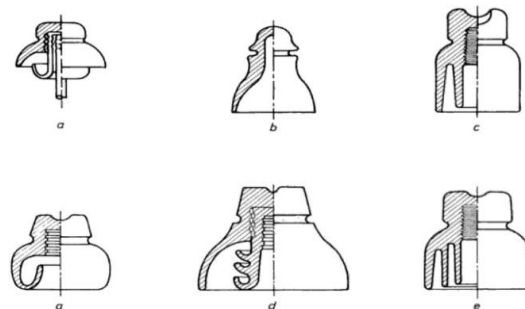
1.1.1 Ιστορική αναδρομή

Τα πρώτα ηλεκτρικά δίκτυα στα οποία χρησιμοποιήθηκαν μονωτήρες ήταν τα τηλεγραφικά αφού σύντομα διαπιστώθηκε ότι η άμεση προσάρτηση των αγωγών σε ξύλινους στύλους είχε απογοητευτικά αποτελέσματα, ειδικά όταν ο καιρός ήταν βροχερός [4]. Οι τηλεγραφικοί μονωτήρες (Εικόνα 1.1) χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά το 1835, ενώ η πρώτη γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μήκους 37 μιλίων κατασκευάστηκε το 1882 για τις ανάγκες ηλεκτροφωτισμού πελατών της εταιρίας

Edison Illuminating Company στη Νέα Υόρκη. Το 1890 ο Charles Eugene Lancelot Brown υιοθέτησε τους μονωτήρες ελαίου, γεγονός που συνέδραμε στην κατασκευή της γραμμής μεταφοράς Lauffen-Frankfort μήκους 115 μιλίων και τάσης 8kV [1].

Η εφεύρεση των μονωτήρων ανάρτησης κατέστησε δυνατή τη μεταφορά ισχύος υψηλής τάσης. Πολλαπλές σειρές μονωτήρων χρησιμοποιήθηκαν σε μεγάλη κλίμακα, στην κατασκευή δικτύων. Μεταξύ των πρώτων που σχεδίαζαν και παρήγαγαν μαζικά κεραμικούς μονωτήρες ήταν εταιρείες στο Ηνωμένο Βασίλειο ήδη από τα μέσα της δεκαετίας του 1840 [5]. Τα χρόνια που ακολούθησαν η ανάπτυξη των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας και παράλληλα των μονωτήρων ήταν ταχύτατη: από το 1903 έως το 1910 είχαν κατασκευαστεί και τεθεί σε λειτουργία γραμμές μεταφοράς των 40kV και των 60kV στην Ευρώπη, ενώ από το 1912 υπάρχουν περιγραφές για γραμμές των 140kV στο Michigan των ΗΠΑ [6].

Καθώς όμως οι τάσεις των δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας έφτασαν και ξεπέρασαν τα 60kV, το βάρος και ο όγκος των απαιτούμενων μονωτήρων αυξήθηκε δραματικά. Οι νέες απαιτήσεις σύντομα αποκάλυψαν σοβαρές ελλείψεις όχι μόνο στα μονωτικά υλικά κατασκευής αλλά και στα σχήματα των μονωτήρων τα οποία αρχικά, ήταν αντίγραφα των τηλεγραφικών. Επιπλέον, το κόστος της απώλειας ισχύος και των ζημιών που μπορεί να προκύψουν λόγω πιθανής αστοχίας των μονωτήρων αυξήθηκε δραματικά [1].



Εικόνα 1.1 Μονωτήρες που χρησιμοποιούνταν σε δίκτυα τηλεγράφων και στη μεταφορά Η.Ε.

[1]

Τα παραπάνω οδήγησαν σε περαιτέρω μελέτη για βελτίωση της απόδοσης και της αξιοπιστίας των μονωτήρων υπό συνθήκες ρύπανσης πλέον, ενώ σταδιακά αναπτύχθηκαν τύποι ανθεκτικών δισκοειδών μονωτήρων με μεγάλο μήκος ερπυσμού¹

¹ 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) [3].

και σχήμα που θα τους επέτρεπε να χρησιμοποιηθούν αποδοτικά στις εναέριες γραμμές [6]. Οι μονωτήρες σκληρυμένης υάλου, οι οποίοι για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκαν το 1935, έφεραν αισθητή βελτίωση, λόγω της μεγαλύτερης αντοχής τους, αλλά στερούνταν της δυνατότητας ανάρτησης που απαιτούνταν για λειτουργία γραμμών χιλιάδων Volt. Στις αρχές της δεκαετίας του '60, έγιναν οι πρώτες επιστημονικές μετρήσεις και πειράματα σε διαφορετικούς τύπους μονωτήρων που βρίσκονταν ήδη σε χρήση, ενώ την ίδια περίοδο εισήχθη ο τύπος μονωτήρα με ανθεκτική επίστρωση, ο οποίος απέδωσε εξαιρετικά τόσο σε συνθήκες τεχνητής όσο και πραγματικής ρύπανσης [1].

Οι συνθετικοί μονωτήρες αναπτύχθηκαν στις ΗΠΑ τη δεκαετία του 1950 με σκοπό αρχικά τη μείωση του βάρους. Ωστόσο, αυτή η τεχνολογία δεν ελήφθη σοβαρά υπόψη μέχρι τη δεκαετία του 1970, όπου σημειώθηκε σημαντική τεχνολογική πρόοδος όσον αφορά τα συνθετικά και τα πολυμερικά υλικά, από τα οποία αποτελείται το περίβλημα των μονωτήρων αυτών. Συγκεκριμένα, η καλή μονωτική συμπεριφορά της σιλικόνης υπό συνθήκες ρύπανσης, η αντοχή των συνθετικών μονωτήρων στη θραύση όταν υπόκεινται σε μηχανικά φορτία κατά τη λειτουργία τους και το μειωμένο βάρος τους, συνέβαλαν στην ευρεία αποδοχή και διάδοσή τους. Από τότε έως σήμερα γίνονται προσπάθειες βελτίωσης της ποιότητας και της αξιοπιστίας των συνθετικών μονωτήρων ώστε να καλυφθούν πλήρως οι απαιτήσεις των δικτύων μεταφοράς και διανομής [7] [8].

1.2 Κατηγορίες μονωτήρων

Οι μονωτήρες κατηγοριοποιούνται κατά βάση, ως προς τη χρήση και τη θέση τους στο δίκτυο ως ακολούθως [9]:

Μονωτήρες διέλευσης (bushings): ο μονωτήρας διέλευσης επιτρέπει σε έναν ηλεκτροφόρο αγωγό να περάσει ασφαλώς μέσω κελύφους διαφορετικού δυναμικού, εσωκλείοντάς τον (π.χ. ακροδέκτες μετασχηματιστών ή διακοπών ισχύος). Οι μονωτήρες διέλευσης συνήθως κατασκευάζονται από πορσελάνη (αν και χρησιμοποιούνται και μονωτήρες από συνθετικό περίβλημα). Ο σχεδιασμός τους πρέπει να διασφαλίζει κυρίως αντοχή σε ηλεκτρικά φαινόμενα μεταβατικής κατάστασης αλλά και μηχανική αντοχή στη διάτρηση [1].

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 [10].

- **Τύπου cap & pin:** Οι μονωτήρες ανάρτησης τύπου cap & pin, συνήθως χρησιμοποιούνται ως τμήματα αλυσίδας ανάρτησης ενός ηλεκτροφόρου αγωγού. Η διάταξη αλυσίδας πλεονεκτεί στη συντήρηση αφού ένα φθαρμένο τμήμα αντικαθίσταται εύκολα με νέο. Ένας μονωτήρας τύπου cap & pin περιλαμβάνει δύο μεταλλικά μέλη: το κάλυμμα και τον πείρο, στερεωμένα σε αντίθετες επιφάνειες (ο πείρος ενσωματώνεται με τσιμέντο ή άλλο μονωτικό υλικό στην εσωτερική κοιλότητα του κελύφους) ενός κατάλληλα διαμορφωμένου κεραμικού κελύφους [10]. Ανάλογα με την κατασκευή και τον τρόπο σύνδεσης του πείρου και του καλύμματος, υπάρχουν στο εμπόριο μονωτήρες σφαίρας-υποδοχής (ball & socket), ναυτικού συνδέσμου-δακτυλίου (clevis & ring), ναυτικού συνδέσμου-γλώσσας (clevis & tongue) κ.α. (βλ. Εικόνα 1.7)
- **Τύπου μεγάλου μήκους (long rod):** Οι πρώτοι μονωτήρες τύπου μεγάλου μήκους από πορσελάνη κατασκευάστηκαν στη Γερμανία τη δεκαετία του 1920 ως εναλλακτική λύση για τους μονωτήρες τύπου cap & pin.

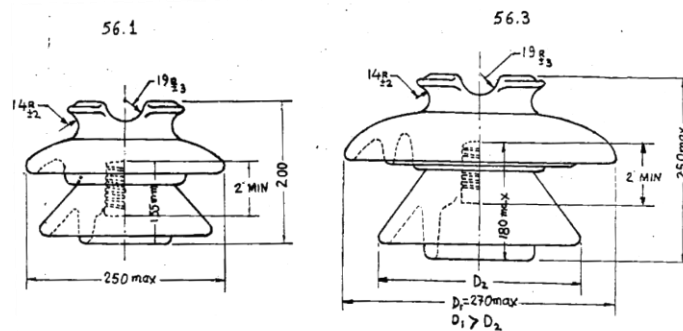


Εικόνα 1.2 Πορσελάνινος μονωτήρας ανάρτησης τύπου μεγάλου μήκους [11]

Υπερτερούν από τους cap & pin λόγω λιγότερων μεταλλικών μερών στα ενδιάμεσα τμήματα του μονωτήρα. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης σε εφαρμογές μεταφοράς ισχύος σε περιβάλλον με ρύπανση. Στους συνθετικούς μονωτήρες τύπου μεγάλου μήκους πλέον, υπάρχει 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 [8].

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

- **Τύπου pin:** Ο μονωτήρας στήριξης τύπου pin χρησιμοποιείται στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για τάσεις έως 33kV. Ανάλογα με το σχέδιό του λέγεται και μονωτήρας τύπου κώδωνος [12]. Ξεκίνησε από τηλεφωνικές γραμμές και αλεξικέραυνα και τροποποιήθηκε για να χρησιμοποιηθεί στις πρώτες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. 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 [10].



Εικόνα 1.3 Διαστάσεις κεραμικών μονωτήρων στήριξης τύπου pin βάσει προδιαγραφών ΔΕΗ [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 σφιγκτήρα 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):** 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 γραμμής εγκαθίστανται κάθετα ή οριζόντια. Το υλικό κατασκευής τους συνήθως είναι η πορσελάνη. 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. [8]

- ο **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 [14].

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

Αναλογικά με το μήκος ερπυσμού ή/και το περιβάλλον εγκατάστασης οι μονωτήρες χωρίζονται στις εξής κατηγορίες [14]:

- **Μονωτήρες ομίχλης**, οι οποίοι έχουν διαμόρφωση εξωτερικής επιφάνειας τέτοια ώστε να επιτυγχάνεται μεγάλο μήκος ερπυσμού και να παρέχεται μεγαλύτερη προστασία από υπερπηδήσεις. Χρησιμοποιούνται σε περιοχές όπου παρατηρείται έντονη υγρασία ή και ρύπανση.
- **Μονωτήρες κανονικού τύπου**, μικρότερου μήκους ερπυσμού από τους προηγούμενους, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε κανονικά περιβάλλοντα.
- **Μονωτήρες ανοιχτού προφίλ**, οι οποίοι δεν έχουν πτυχώσεις στην επιφάνειά τους για χρήση σε περιβάλλον με χαμηλά επίπεδα ρύπανσης ή εντός εσωτερικών χώρων.

1.3 Μονωτικά υλικά των μονωτήρων

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) [15].

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].

1.3.1 Κεραμικοί μονωτήρες

Τα κεραμικά υλικά αποτελούνται από ανόργανες ενώσεις που περιλαμβάνουν ισχυρούς δεσμούς πυριτίου με οξυγόνο. Χαρακτηρίζονται από μεγάλες τιμές επιφανειακής ενέργειας, συνεπώς παρουσιάζουν υδρόφιλη συμπεριφορά [1].

Όσον αφορά τη μηχανική συμπεριφορά, τα κεραμικά υλικά είναι σκληρά, ισχυρά - με ιδιότητες ακαμψίας και μηχανικής αντοχής συγκρίσιμες με αυτές των μετάλλων – και ελάχιστα ελαστικά. Επιπλέον, τα κεραμικά υλικά είναι ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες. Ιστορικά, τα κεραμικά έχουν δείξει εξαιρετική ευθραυστότητα (έλλειψη ολκιμότητας) και είναι πολύ ευαίσθητα σε χτύπημα. Ωστόσο, τα νεότερα κεραμικά κατασκευάζονται ώστε να έχουν βελτιωμένη αντίσταση στη θραύση [15]. Τα κεραμικά υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί ως υλικά μόνωσης στους υπαίθριους μονωτήρες είναι η πορσελάνη και το γυαλί.

Στο ελληνικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας οι κεραμικοί μονωτήρες επικρατούν σε ποσότητα, ωστόσο η εγκατάσταση πορσελάνινων μονωτήρων σε νέες κατασκευές έχει σταματήσει². Η ΔΕΗ είχε θέσει αυστηρές τεχνικές προδιαγραφές για τους γυάλινους και πορσελάνινους μονωτήρες που προμηθεύεται (βλ. Πίνακας 1.1) και βάσει των προδιαγραφών αυτών, θα πρέπει να περάσουν επιτυχώς αρκετές δοκιμές (υπερπήδησης, κρουστικής τάσης, μηχανικής φόρτισης, θερμικής καταπόνησης, κρούσεως, κ.α.) από τον κατασκευαστή πριν την προμήθεια και εγκατάστασή τους στο δίκτυο μέσης τάσης [13].

² Η ΔΕΗ είχε σταματήσει από το 2008 την εγκατάσταση πορσελάνινων μονωτήρων με μήκος ερπυσμού 33cm και 53cm αφού θεωρούνται κατάλληλοι μόνο για περιοχές με ελαφρά ρύπανση. Πλέον στις νέες κατασκευές δικτύου ο ΔΕΔΔΗΕ εγκαθιστά μόνο συνθετικούς μονωτήρες.

Χαρακτηριστικά		Μονωτήρες στήριξης				
Μήκος ερπυσμού	cm	33	43	53	61	68
Τυποποίηση	Κατασκευής	ASA C29.6 CLASS 56-1	ASA C29.6 CLASS 56-2	ASA C29.6 CLASS 56-3		ASA C29.6 CLASS 56-4
	Δοκιμών	ANSI C29.1	ANSI C29.1	ANSI C29.1	ANSI C29.1	ANSI C29.1
Υλικό κατασκευής μονωτήρα	Πορσελάνη υγρής μεθόδου με εφυάλωση φαιού χρώματος ή σκληρυμένο γυαλί					
Σήμανση	Επωνυμία κατασκευαστή, έτος κατασκευής και τύπος μονωτήρα					
Μήκος ηλεκτρικού τόξου εν ξηρώ	cm	17,8	21,5	24,1		28,6
Τάση υπερπήδησης εν ξηρώ σε 50Hz	kV	95	110	125	125	140
Τάση υπερπήδησης εν υγρώ σε 50Hz	kV	60	70	80	60	95
Κρίσιμη κρουστική τάση υπερπήδησης θετική	kV	150	175	200	200	225
Κρίσιμη κρουστική τάση υπερπήδησης αρνητική	kV	190	225	265	200	310
Τάση διατηρήσεως	kV	130	145	165	165	185
Ραδιοφωνικές παρεμβολές με τάση δοκιμής στα 50Hz	kV	15	22	30	30	30
Αντοχή σε κάμψη	Kp	1300	1300	1300	1300	1300
Μέγιστο ύψος	cm	20	20	25	21±1,1	25
Μέγιστη διάμετρος	cm	25	25	27	20±0,5	31
Ακτίνα κορυφαίου αύλακα υποδοχής του αγωγού	cm	19	19	19	19	19
Ακτίνα πλευρικού αύλακα υποδοχής του αγωγού	cm	14	14	14	14	14

Πίνακας 1.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά (ΔΕΗ) κεραμικών μονωτήρων στήριξης τύπου κώδωνος δικτύων διανομής ΗΕ [13]

1.3.1.1 Μονωτήρες πορσελάνης

Οι μονωτήρες πορσελάνης κατασκευάζονται από πορσελάνη υγρής μεθόδου³ παρασκευής, με εφυάλωση (τύπου συμπίεσεως), δηλαδή επιφανειακή επίστρωση

³ Τα προπλάσματα υποβάλλονται σε κατεργασία υγρής μεθόδου ως εξής: Ξηραίνονται μερικώς ώστε το ποσοστό υγρασίας να μειωθεί στο 16 - 17% και συμπιέζονται εν θερμώ εντός κατάλληλης μήτρας ή κατεργάζονται σε τόρνο, προκειμένου ο μονωτήρας να αποκτήσει το επιθυμητό σχήμα. Τα κοπτικά εργαλεία των τόρνων αποτελούνται από ανθρακούχο βολφράμιο. Τα επεξεργασμένα τεμάχια ξηραίνονται περαιτέρω στη συνέχεια σε φούρνο. Η υγρά μέθοδος έχει το πλεονέκτημα ότι δεν παράγει σκόνη κατά την επεξεργασία, για το λόγο αυτό διαδόθηκε ευρέως [12].

στρώματος λείου και σκληρού από γυαλί, φαιού ή λευκού χρώματος. Η εφυάλωση⁴ συμβάλλει στη διατήρηση της καθαρότητας της επιφάνειας του μονωτήρα (ξεπλένεται εύκολα με τη βροχή) αλλά και στη μηχανική του ενίσχυση [12].

Η πορσελάνη είναι κεραμικό υλικό με μείγμα από πυριτικά άλατα αργιλίου. Τα περισσότερα δοκίμια πορσελάνης δημιουργούνται από το μείγμα σωματιδίων διαφόρων μεγεθών, κρυστάλλων και πόρων. Η πορσελάνη μεταξύ άλλων έχει τις παρακάτω ιδιότητες [14]:

- $\tan\delta$ (50Hz): 0,01 - 0,03
- Αγωγιμότητα: 10^{11} Ωm
- Τάση εφελκυσμού: 40-80 MPa
- Διηλεκτρική αντοχή: 200kV/cm
- Σχετική διηλεκτρική σταθερά (25°C, 50Hz): 6-7

Οι βιομηχανικές πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή πορσελάνης ποικίλουν από χώρα σε χώρα ανάλογα με την ποιότητα της παραγόμενης πορσελάνης και τη δυνατότητα εξεύρεσης πρώτων υλών.

Οι βασικές πρώτες ύλες της πορσελάνης των μονωτήρων είναι [15] [12]:

- Άργιλος (Clay) με συνήθη περιεκτικότητα 45% Al_2O_3 , 55% SiO_2 .
- Άστριο (Feldspar) με συνήθη περιεκτικότητα 16% $KNaO$, 18% Al_2O_3 , 66% SiO_2 .
- Χαλαζίας (Quartz) με περιεκτικότητα 100% SiO_2 .

Η χρησιμοποιούμενη τελική σύνθεση των πιο πάνω πρώτων υλών καθορίζει και την ποιότητα της παραγόμενης πορσελάνης. Γενικά για τη σύνθεση των πρώτων υλών της πορσελάνης ισχύουν τα εξής: Ο εμπλουτισμός σε άστριο αυξάνει τη διηλεκτρική αντοχή της πορσελάνης. Ο εμπλουτισμός σε άργιλο και καολίνη αυξάνει την αντοχή σε απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας, ενώ ο εμπλουτισμός σε αλουμίνα (Al_2O_3) συμβάλλει στη μηχανική αντοχή [15].

⁴ 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 συμπίεσεως [12].

Η κατασκευή βασίζεται στην ιδιότητα της πλαστικότητας των αργιλωδών υλικών, δηλαδή να παραμορφώνονται με την ενέργεια εξωτερικής επιδράσεως και να διατηρούν την παραμόρφωση (νέα μορφή) και μετά την παύση της επιδράσεως. Η πλαστικότητα της ζύμης ρυθμίζεται από την ποιότητα και τη φύση του νερού. Η πλαστική ζύμη επεξεργάζεται σε πιεστήρια και φίλτρα. Συγκρατεί δε 18 - 22% νερό. Στη συνέχεια περνάει από ειδικές διατάξεις όπου εξαερώνεται και γίνεται ομοιογενής, με την επίδραση κενού. Συμπιέζεται και παίρνει μορφή κυλινδρικού προπλάσματος. Τέλος, οι μονωτήρες ψήνονται σε φούρνο τύπου σήραγγας μεγάλου μήκους σε θερμοκρασία που κυμαίνεται μεταξύ 1280°C και 1400°C [15].



Εικόνα 1.4. Μονωτήρες ανάρτησης τύπου cap & pin από πορσελάνη [16]

Οι πορσελάνινοι μονωτήρες είναι ανθεκτικοί στις περιβαλλοντικές καταπονήσεις, στις μηχανικές δυνάμεις και στην επιφανειακή διάβρωση. Σοβαρό μειονέκτημα τους όμως 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 [1].

1.3.1.2 Μονωτήρες γυαλιού

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 SiO_2 σε ποσοστό 70% περίπου, το ανθρακικό Νάτριο CO_3Na σε ποσοστό (περίπου) 15% και ο Δολομίτης $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ σε ποσοστό 15%. Έτσι η τελική σύνθεση του γυαλιού είναι περίπου: SiO_2 : 68%, Na_2O : 11%, K_2O : 3,5%, CaO : 6,5%, Mg : 3,5% και Al_2O_3 : 4%. Η ύπαρξη του οξειδίου του φθορίου (F_2O_3) στο γυαλί προσδίδει το ελαφρά γαλαζοπράσινο χρώμα [12] [15].



Εικόνα 1.5. Γυάλινος μονωτήρας ανάρτησης cap & pin τύπου ομίχλης [17]

Για την κατασκευή των γυάλινων μονωτήρων το γυαλί υποβάλλεται σε ειδική κατεργασία με "βαφή", δηλαδή ευρισκόμενο σε ρευστή κατάσταση, εκτίθεται σε ρεύμα ψυχρού αέρα⁵ ή εμβαπτίζεται σε λάδι ή νερό. Η ραγδαία μείωση της θερμοκρασίας δημιουργεί ένα σκληρό επιφανειακό στρώμα.

Το γυαλί μεταξύ άλλων έχει τις παρακάτω ιδιότητες [14]:

- $\tan\delta$ (50Hz): 0,06
- Αγωγιμότητα: 10^{11} Ωm
- Τάση εφελκυσμού: 100-120 MPa
- Τάση σύνθλιψης: 700 MPa
- Σχετική διηλεκτρική σταθερά (25°C, 50Hz): 7

⁵ Ο μονωτήρας αφού πάρει το επιθυμητό σχήμα του μέσα σε μήτρα, θερμαίνεται μέχρι του σημείου μαλάξεώς του. Στη συνέχεια ψύχεται άμεσα με ειδικό ψεκάσμο κρύου αέρα. Έτσι, σκληραίνεται η επιφάνεια του γυαλιού δίνοντας περισσότερο χρόνο στο εσωτερικό να κρυώσει. Αυτό επιτρέπει στο εξωτερικό στρώμα να κρυσταλλοποιηθεί σε ευρύτερο πλέγμα ενώ το εσωτερικό στερεοποιείται με μεγαλύτερη συμπίεση από το κρυσταλλικό πλέγμα. Το αποτέλεσμα είναι ένα φύλλου γυαλιού το οποίο είναι δύο ή τρεις φορές πιο δυνατό από το μη σκληρυμένο γυαλί και το οποίο στη θραύση θρυμματίζεται σε πολύ μικρά κομματάκια με αμβλείες άκρες [12].

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).

Τέλος, ένα βασικό χαρακτηριστικό των μονωτήρων γυαλιού το οποίο τους καθιστά κατάλληλους για γραμμές μεταφοράς και διανομής είναι το γεγονός ότι έχουν την ιδιότητα να αποθηκεύουν σημαντική ενέργεια όταν υπόκεινται σε μηχανικές καταπονήσεις. Όταν αυτή η ενέργεια απελευθερωθεί, είτε λόγω μηχανικής κρούσης είτε σε περίπτωση ηλεκτρικής εκκενώσεως, τότε το σώμα του διασπάται σε μικρά θραύσματα, (σε αντίθεση με τον μονωτήρα πορσελάνης που συνήθως ρηγματώνεται το σώμα του χωρίς να κομματιάζεται) με αποτέλεσμα ο εντοπισμός της τυχόν βλάβης να είναι εύκολος κατά την επιθεώρηση του δικτύου [9].

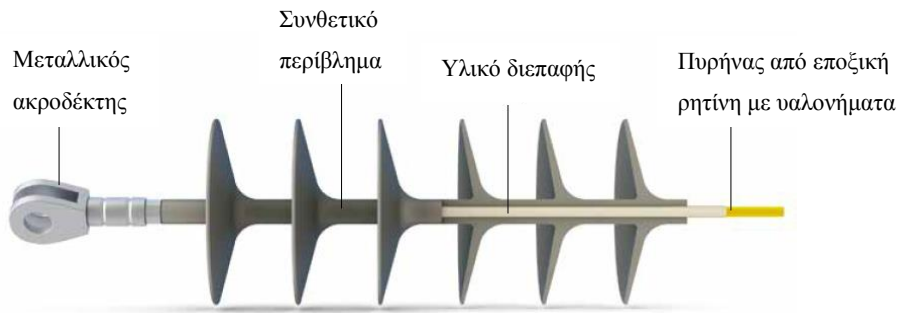
1.3.2 Συνθετικοί μονωτήρες

Ο συνθετικός μονωτήρας αποτελείται από τους μεταλλικούς ακροδέκτες από γαλβανισμένο χάλυβα, το περίβλημα από πολυμερές υλικό (insulating housing) καθώς και τον ενισχυμένο με υαλονήματα πυρήνα συνθετικής ρητίνης, σχήματος ράβδου [8].

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. Για την κατασκευή του πολυμερικού περιβλήματος χρησιμοποιήθηκε διαχρονικά πλήθος υλικών. Από τα πρώτα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η δισφαινόλη και οι κυκλοαλειφατικές εποξειδικές ρητίνες (CE)⁶. Αυτά εισήχθησαν στο εμπόριο κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1970.

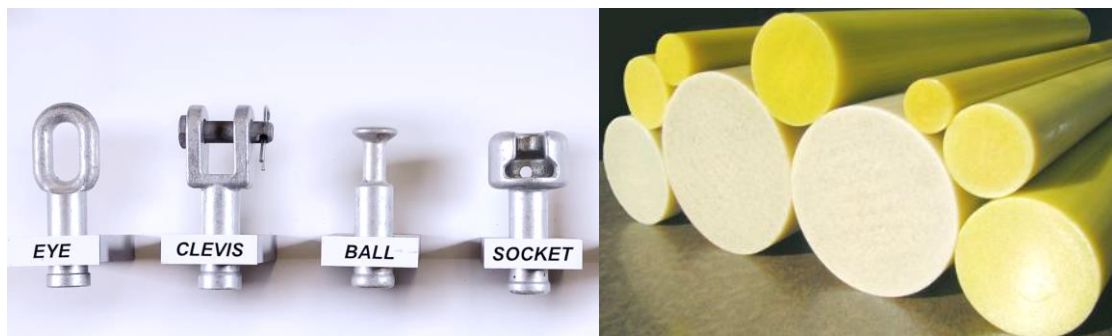
⁶ Οι κυκλοαλειφατικές ρητίνες χρησιμοποιούνταν για χύτευση μονωτήρων με σχήμα παρόμοιο με των μονωτήρων πορσελάνης με τη μέθοδο *one-piece casting* για εξάλειψή των προβλημάτων της προσάρτησης καθενός πτερυγίου ξεχωριστά πάνω στον πυρήνα. Το γεγονός όμως ότι σε περιβάλλον με κακές καιρικές συνθήκες (κυρίως λόγω της υπερϊώδους ακτινοβολίας) οι επιφάνειες των μονωτήρων

Οι εποξειδικές ρητίνες⁷ δισφαινόλης εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μονωτήρων, ενώ οι CE χρησιμοποιούνται ευρέως για εσωτερικές εγκαταστάσεις ισχύος [18].



Εικόνα 1.6. Συνθετικός μονωτήρας [8]

Τα κυρίαρχα όμως 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 [19].



Εικόνα 1.7 Διάφορα σχέδια μεταλλικών ακροδεκτών (αριστερά) και πυρήνες διαφορετικής διαμέτρου από εποξειδική ρητίνη (δεξιά) συνθετικών μονωτήρων [20]

αυτών γίνονται τραχιές αποτέλεσε βασικό παράγοντα για την σχεδόν αποκλειστική χρήση τους σε εσωτερικές εγκαταστάσεις [33].

⁷ Οι εποξειδικές ρητίνες είναι διαλυτά, θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή χαμηλού μοριακού βάρους. Αποτελούν κατηγορία ρητινών που στα συστατικά τους περιέχουν μια εποξειδική ομάδα ανά μόριο (ένα άτομο οξυγόνου που ενώνεται με δύο άτομα άνθρακα, τα οποία είναι ήδη συνδεδεμένα με κάποιον τρόπο). Για την προσθήκη ιδιοτήτων ελαστικότητας στο τελικό υλικό στη ρητίνη προστίθενται σκληρυντικά και επιταχυντικά πληρωτικά μέσα και χρωστικές. [90]

Οι ράβδοι του πυρήνα κατασκευάζονται από εποξειδική ρητίνη οπλισμένη με υαλονήματα, συνήθως σε παρτίδες συγκεκριμένου μήκους με διαδικασία συνεχούς εξόλκησης (pultrusion). Ο πυρήνας των μονωτήρων στήριξης σχεδιάζεται για αντοχή σε δυνάμεις κάμψης γι αυτό είναι συνήθως πολλαπλάσιας διαμέτρου από τον πυρήνα των μονωτήρων ανάρτησης ο οποίος σχεδιάζεται για αντοχή σε εφελκυσμό. Για τους ίδιους λόγους, στους μονωτήρες ανάρτησης και στήριξης τα υαλονήματα είναι αξονικά κατανεμημένα μέσα στον πυρήνα (ενώ στους μονωτήρες διέλευσης πλέκονται) [8]. Η ομοιόμορφη κατανομή των υαλονημάτων εξασφαλίζει μηχανική ισοφόρτιση κατά τη λειτουργία του μονωτήρα ενώ ο ομοιόμορφος εμποτισμός τους με εποξική ρητίνη εξασφαλίζει τη συμπαγεια και την ομοιογένεια του πυρήνα. Για να βελτιωθεί η μηχανική αντοχή, ορισμένοι κατασκευαστές χρησιμοποιούν E-glass, δηλαδή βόριο-πυριτικό γυαλί με προσμίξεις οξειδίου του ασβεστίου, οξειδίου του αλουμινίου και χαμηλή περιεκτικότητα σε αλκαλικά. Το μέγεθος του γυαλιού των ινών είναι σημαντικό για τη σύνδεση με τη μήτρα της ρητίνης, η οποία πρέπει να είναι «ηλεκτρικά διαβαθμισμένη», χαμηλής απορροφητικότητας υγρασίας και οι ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες της να παραμένουν αμετάβλητες [9].



Εικόνα 1.8 Ακροδέκτες ενσωματωμένοι στους πυρήνες (αριστερά) πριν το στάδιο της χύτευσης του ελαστομερούς περιβλήματος (δεξιά) [92]

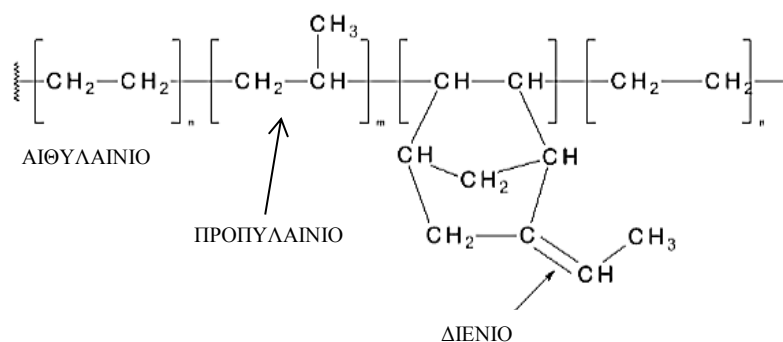
Οι μεταλλικοί ακροδέκτες (end fittings) οι οποίοι κατασκευάζονται συνήθως είτε από μηχανικά κατεργασμένο αλουμίνιο, είτε από χυτό ή από σφυρήλατο ατσάλι, πρεσάρονται στα άκρα του πυρήνα με πολυγωνικές πρέσες και τα σχέδιά τους ποικίλουν (βλ. Εικόνα 1.7) ανάλογα με τον εξοπλισμό με τον οποίο θα προσαρτηθεί ο μονωτήρας και το είδος των μονωτήρων (ανάρτησης, στήριξης κ.τ.λ.). 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].

1.3.2.1 Μονωτήρες με περίβλημα αιθυλοπροπυλοδιενίου (EPDM)

Το αιθυλοπροπυλοδιένιο (EPDM) είναι μια ένωση αρκετά ανθεκτική στην ηλιακή ακτινοβολία, το οξυγόνο, την υγρασία, τα οξέα και τα αλκάλια. Αυτό το άοσμο ελαστομερές χαρακτηρίζεται επίσης από μεγάλη αντοχή στη θερμότητα [15].

Η περιεκτικότητα του σε αιθυλένιο και διένια μπορεί να επηρεάσει αρκετά τις φυσικές του ιδιότητες. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.9 η περιεκτικότητα του μονωτικού περιβλήματος EPDM των μονωτήρων σε άτομα άνθρακα είναι αρκετά μεγάλη ώστε οι επιφανειακές εκκενώσεις να δημιουργήσουν, συν τω χρόνω, αγωγίμες διαδρομές στην επιφάνεια του [21].



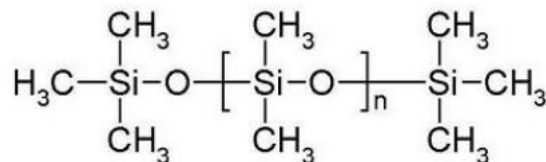
Εικόνα 1.9 Χημική δομή του ατόμου του EPDM [22]

Οι ιδιότητες του αιθυλοπροπυλοδιενίου μεταξύ άλλων είναι [21, 23]:

- $\tan\delta$ (50Hz): 0,025
- Αγωγιμότητα: 10^{-12} Ωm
- Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας: 150 °C
- Σχετική διηλεκτρική σταθερά (25°C, 50Hz): 2,7 – 3,1
- Διηλεκτρική αντοχή (50Hz): 330 kV/cm
- Πυκνότητα: 1,33 – 1,47 g/cm³

1.3.2.2 Μονωτήρες περιβλήματος ελαστομερούς σιλικόνης (SiR)

Η χημική σύνθεση του ελαστομερούς σιλικόνης (Silicone Rubber) οφείλεται σε ενώσεις του πολυδιμεθυλοσιλοξανίου (PDMS). Οι σιλικόνες ανήκουν στη γενική κατηγορία συνθετικών πολυμερών των οποίων η κύρια αλυσίδα δομείται από επαναλαμβανόμενους δεσμούς πυριτίου – οξυγόνου. Κάθε δεσμός πυριτίου (Si) οξυγόνου συνδέεται με δύο ομάδες μεθυλίου (-CH₃) 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 σιλικόνης [19]. Να εμφανίζεται δηλαδή, τάση απόθησης των μορίων του νερού από την επιφάνεια με αποτέλεσμα να σχηματίζονται διακριτές σταγόνες νερού κατά τη διαβροχή του.



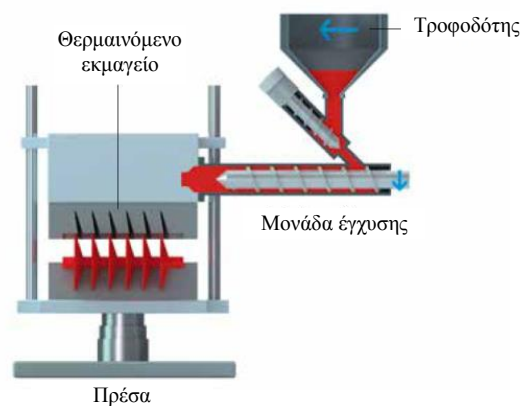
Εικόνα 1.10 Χημική δομή του PDMS [24]

Οι ιδιότητες της σιλικόνης μεταξύ άλλων είναι [15]:

- $\tan\delta$ (50Hz): 0,02 – 0,03
- Αγωγιμότητα: 10^{-13} Ωm
- Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας: 350 °C
- Σχετική διηλεκτρική σταθερά (25°C, 50Hz): 4
- Διηλεκτρική αντοχή (50Hz): 160 - 200 kV/cm
- Θερμική αγωγιμότητα W/mK: 0,23
- Πυκνότητα: 1,1 – 1,6 g/cm³

Το ελαστομερές σιλικόνης αντέχει σε ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες, λειτουργώντας συνήθως μεταξύ -40 και 200°C, είναι αδρανές σε χημικά και διαλύτες, έχει μεγάλη αντοχή σε κραδασμούς και χτυπήματα, αντίσταση στη διάβρωση, στην υπεριώδη ακτινοβολία και στη φλόγα και σχετικά εύκολη και οικονομική παρασκευή συγκριτικά με συμβατικά πολυμερή. Η διαδικασία παραγωγής του υλικού silicone rubber χωρίζεται ουσιαστικά σε τρία κύρια στάδια: Στο πρώτο στάδιο γίνεται η

παραγωγή των δομικών στοιχείων του πολυμερούς μορίου δηλαδή των μονομερών. Στην συνέχεια ακολουθούν στάδια πολυμερισμού, ώστε να προκύψει η επιθυμητή κατανομή μοριακών βαρών και το προϊόν που προκύπτει από τη διαδικασία αυτή έχει την μορφή πλαστελίνης (βλ. Εικόνα 1.11 αριστερά). Μετά τον πολυμερισμό, ακολουθείται η διαδικασία της χύτευσης και του βουλκανισμού⁸ είτε σε υψηλή θερμοκρασία HTV (High Temperature Vulcanization) είτε σε θερμοκρασία δωματίου RTV (Room Temperature Vulcanization)⁹. Το υψηλό ιξώδες του πολυμερούς HTV SiR



Εικόνα 1.11 Ελαστομερές σιλικόνης πριν το βουλκανισμό (αριστερά) και κατά τη χύτευσή του (δεξιά) [20]

απαιτεί χύτευση με έγχυση υψηλής πίεσης (1.500 bar και άνω) [25]. Η χύτευση γίνεται σε ένα ή περισσότερα βήματα με κατάλληλες πρέσες μέσα σε ειδικά διαμορφωμένο εκμαγείο στο κέντρο του οποίου έχει τοποθετηθεί ο πυρήνας. Κατά το βουλκανισμό αναπτύσσονται δεσμοί (crosslinks) μεταξύ των πλευρικών μεθυλίων, με την συμμετοχή ελεύθερων ριζών, οι οποίες αποσπών άτομα υδρογόνου, με σκοπό την δημιουργία μιας στερεάς δομής. Η διαδικασία λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασία από 115°C μέχρι 173°C [26]. Ο βουλκανισμός σε υψηλή θερμοκρασία αποτελεί την κύρια μέθοδο παραγωγής ελαστομερών σιλικόνης ειδικά για εφαρμογές κατασκευής συνθετικού περιβλήματος μονωτήρων (95% του συνόλου των συνθετικών μονωτήρων) [25]. Τέλος, τα προϊόντα διατηρούνται για μικρό διάστημα σε υψηλή θερμοκρασία (post curing process), με σκοπό την απομάκρυνση πτητικών παραπροϊόντων.

⁸ Ο βουλκανισμός είναι μία χημική, μη αντιστρεπτή αντίδραση που χρησιμοποιείται για το σχηματισμό διασταυρώσεων στα ελαστομερή υλικά, με αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση της μορφολογικής δομής του [15].

⁹ Κατά το βουλκανισμό σε θερμοκρασία δωματίου η ατμοσφαιρική υγρασία ενεργοποιεί την ανάπτυξη των σταυροσυνδέσεων η οποία επιτελείται μέσω ατόμων οξυγόνου και πραγματοποιείται με αντιδράσεις συμπύκνωσης ομάδων από σιλανόλες, με την συμμετοχή νερού και κατάλληλου καταλύτη [26].

1.3.2.3 Προσθήκη βελτιωτικών προσμίξεων (fillers)

Όταν το υλικό είναι εκτεθειμένο σε ηλεκτρική δραστηριότητα, καταπονείται από την διάσπαση των ξηρών ζωνών, που μπορούν να δημιουργηθούν στην επιφάνεια. Η δραστηριότητα αυτή μπορεί να οδηγήσει σε σχηματισμό αγωγίων καναλιών άνθρακα (tracking), δηλαδή μόνιμης παραμόρφωσης, με αποτέλεσμα τη διάβρωση (erosion) κατά την οποία παρατηρείται απώλεια μάζας του υλικού.

Για να αντιμετωπισθούν τα παραπάνω φαινόμενα, τα οποία οδηγούν σε μια μη αντιστρεπτή υποβάθμιση της δομής και φυσικά των ιδιοτήτων του συνθετικού περιβλήματος¹⁰, γίνεται προσθήκη της κατάλληλης αναλογίας βελτιωτικών προσμίξεων (reinforcing fillers) στο βασικό πολυμερές [27]. Οι βελτιωτικές προσμίξεις είναι στερεά υλικά ικανά να αλλάξουν τις φυσικές και χημικές ιδιότητες των ελαστομερών με την απόδοση σ' αυτά, των ιδιοτήτων τους [28]. Βελτιώνουν τη συμπεριφορά τους και ενισχύουν τις θερμικές, μηχανικές, αντιδιαβρωτικές και υδροφοβικές ιδιότητες τους [29].

Υλικά όπως το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2), η ένυδρη αλουμίνα ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$) Alumina Trihydrate (ATH) και τα νιτρίδια του βορίου χρησιμοποιούνται ως πρόσθετα ενισχυτικά της δομής [30].

Η ένυδρη αλουμίνα (ATH) λειτουργεί ως επιβραδυντικό φλόγας αφού σε θερμοκρασία άνω των $220^\circ C$ απελευθερώνονται τα μόρια νερού τα οποία περιλαμβάνονται στη δομή του μορίου της με αποτέλεσμα την απορρόφηση ενέργειας [8]. Επιπλέον, στην περίπτωση του SiR, η προσθήκη ATH συνεπάγεται την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας, της αντοχής σε εκκενώσεις και της διηλεκτρικής σταθεράς¹¹. Οι ιδιότητες αυτές σε συνδυασμό με τη χαμηλή τοξικότητά της και την καλή σχέση απόδοσης - τιμής την καθιστούν την προτιμότερη επιλογή για τους μονωτήρες με περίβλημα σιλικόνης [31].

¹⁰ Το σημαντικότερο μειονέκτημα των πολυμερών έγκειται στο γεγονός ότι το βασικό τους στοιχείο, ο άνθρακας, αποτελεί στις περισσότερες περιπτώσεις ένα καλό αγωγό του ηλεκτρικού ρεύματος. Η πιθανή προσβολή της επιφάνειας από τις έρπουσες μερικές εκκενώσεις αυξάνει τοπικά τη θερμοκρασία και δημιουργεί τελικά αγωγίμες επιφανειακές οδούς, οι οποίες είναι δυνατό να οδηγήσουν σε επιφανειακή διάσπαση και δημιουργία υψηλών θερμοκρασιών, οπότε τελικά καταστρέφεται ο μονωτήρας [6].

¹¹ Η προσθήκη ένυδρης αλουμίνας σε μη ενδεδειγμένες ποσότητες έχει αποδειχθεί ότι μπορεί να αναστείλει τις ιδιότητες μηχανικής αντοχής του υλικού [27] αλλά και να αυξήσει το χρόνο μεταφοράς της υδροφοβικότητας επιβραδύνοντας την κίνηση των LMW προς την επιφάνεια [93].



Εικόνα 1.12 Νιτρίδιο του βορίου (αριστερά) και αλουμίνα (Al_2O_3) (δεξιά) [91]

Αντί της ένυδρης αλουμίνας χρησιμοποιείται αρκετά και το διοξείδιο του πυριτίου - με την εμπορική ονομασία *Silica* - το οποίο συνήθως προστίθεται στο μείγμα διαφόρων πολυμερών, με στόχο την βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Τα ελαστομερή σιλικόνης με διοξείδιο του πυριτίου παρουσιάζουν χαρακτηριστικά όπως θερμική σταθερότητα και αντοχή στην οξείδωση και στις καιρικές συνθήκες [32]. Το βασικό πλεονέκτημα της silica, σε σχέση με το ATH, είναι η σημαντικά καλύτερη προσαρμογή της στην δομή του υλικού ειδικά στα RTV SiR. Όπως και η ATH, η silica προσφέρει αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας με αποτέλεσμα την απαγωγή θερμικού φορτίου προς το υπόστρωμα και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του υλικού [27].

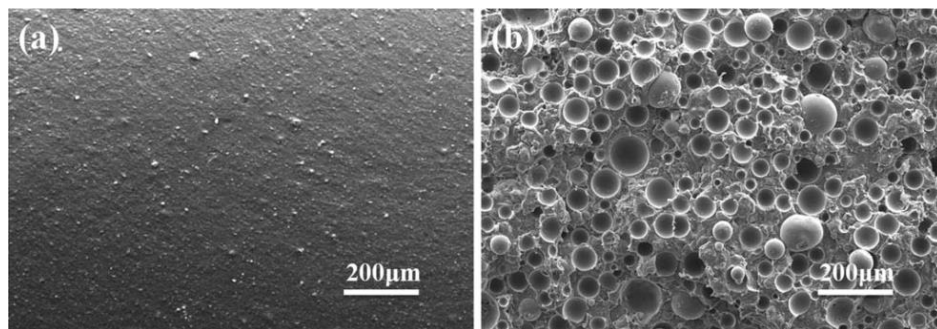
Τα τελευταία χρόνια ένα κομμάτι της έρευνας του τομέα τεχνολογίας υλικών έχει εστιάσει στην κατασκευή ελαστομερών σιλικόνης υψηλής μηχανικής, θερμικής και μονωτικής αντοχής. Συνδυασμός διαφόρων ενώσεων από βελτιωτικές προσμίξεις, όπως το νιτρίδιο του βορίου, τα κοίλα μικροσφαιρίδια γυαλιού, κεραμικών ή silica και ο ένυδρος βορικός ψευδάργυρος με καολίνη, δοκιμάζονται συνεχώς ώστε το τελικό υβριδικό ελαστομερές να συνδυάζει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά από κάθε ανόργανη πρόσμιξη χωρίς να μειώνονται οι ιδιότητες της σιλικόνης [33] [34].

Το νιτρίδιο του βορίου¹² $(BN)_x$ ή αζωτοβόριο είναι ένα νέο είδος υλικού, με μικροδομή εξαγωνικών επιπέδων, παρόμοια με το γραφίτη. Είναι ελαφρύ, έχει εξαιρετικές μονωτικές και μηχανικές ικανότητες, καθώς επίσης θερμική αντοχή (2200 °C) και υψηλή αντίσταση σε θερμικό σοκ, που προκύπτει από την ανισότροπη φύση

¹² Το νιτρίδιο του βορίου είναι ένας κρύσταλλος που αποτελείται από ένα άτομο αζώτου και ένα άτομο βορίου. Η χημική σύνθεση είναι 43,6% βόριο και 56,4% άζωτο. Έχει δομή εξαγωνικών επιπέδων όπως του γραφίτη, γι' αυτό ονομάζεται και εξαγωνικό νιτρίδιο του βορίου ή ανόργανος γραφίτης. [35]

του υλικού. Επίσης παρουσιάζει αντίσταση στη χημική προσβολή παρουσία πολλών τετηγμένων μετάλλων (χημικά αδρανές) και έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα (ηλεκτροκεραμικό). Το BN είναι πολύ αποτελεσματικό στη βελτιστοποίηση της απόδοσης του ελαστομερούς σιλικόνης των υπαίθριων μονωτήρων αφού προσφέρει σημαντική αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας αλλά και βελτίωση των υδροφοβικών του ιδιοτήτων [35].

Η προσθήκη υβριδικού μείγματος από κοίλα μικροσφαιρίδια γυαλιού¹³, κεραμικών και silica, προσδίδει στο ελαστομερές σιλικόνης βελτιωμένες μηχανικές και θερμικές ιδιότητες ενώ παράλληλα μπορεί να μειώσει την πυκνότητα και να ενισχύσει την σκληρότητα του [36]. Επίσης, η χρήση μικροσφαιριδίων γυαλιού αντί της ATH έχει ευεργετικά αποτελέσματα ως προς την ταχύτητα μεταφοράς της υδροφοβικότητας (βλ. υποενότητα 2.3.1.1)



Εικόνα 1.13 Φωτογραφίες της επιφάνειας ελαστομερούς σιλικόνης (a) και ελαστομερούς σιλικόνης με κοίλα μικροσφαιρίδια (b), από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης [36]

Τέλος, με την προσθήκη ένυδρου βορικού ψευδάργυρου έχουν καταγραφεί στο τελικό προϊόν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες όπως αντοχή σε κάμψη και αντοχή σε θλίψη [37].

¹³ Τα κοίλα μικροσφαιρίδια γυαλιού συνήθως κατασκευάζονται από μείγμα γυαλιού βοριοπυριτικού άλατος και παρέχουν χαμηλή πυκνότητα, υψηλή θερμικής και χημικής αντοχή. Τα τοιχώματα των γυάλινων μικροσφαιριδίων είναι άκαμπτα και έχουν συνήθως πάχος το 10% της διαμέτρου της σφαίρας [36].

2 Τεχνικά θέματα συνθετικών μονωτήρων

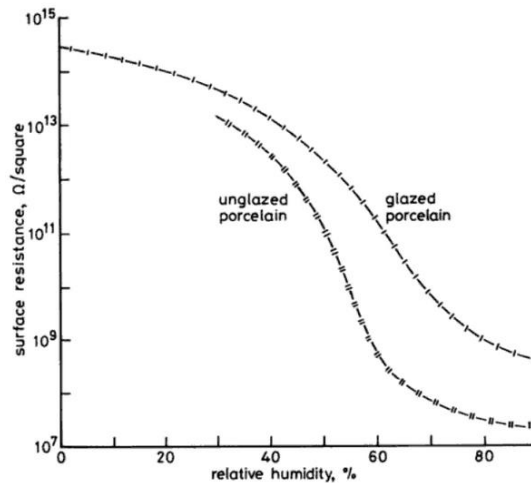
Τις τελευταίες δεκαετίες, οι συνθετικοί μονωτήρες εξαπλώνονται όλο και ταχύτερα στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδας αντικαθιστώντας σταδιακά τους κεραμικούς μονωτήρες. Το χαμηλό τους βάρος (μέχρι και 90% μικρότερο σε σχέση με τους συμβατικούς μονωτήρες), η ευκολία χειρισμού τους, οι εξαιρετικές μονωτικές ιδιότητες τους σε περιβάλλοντα με μεγάλη ρύπανση, η ιδιότητα της μεταφοράς της υδροφοβικότητάς τους, η αντοχή σε βανδαλισμούς και το χαμηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης τους είναι τα χαρακτηριστικά στα οποία οφείλεται η ευρεία χρήση τους στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας [2]. Λόγω της μικρής - συγκριτικά με τους μονωτήρες από κεραμικά υλικά - εμπειρίας στη χρήση συνθετικών μονωτήρων στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, υπάρχουν ζητήματα υπό διερεύνηση πάνω στα οποία διεξάγεται έρευνα, γίνονται συνεχείς δοκιμές και μετρήσεις, παράλληλα με την πρόοδο της τεχνολογίας υλικών. Κάποια από αυτά αναλύονται στις επόμενες ενότητες.

2.1 Καταπονήσεις στους υπαίθριους μονωτήρες

Η λειτουργία των μονωτήρων καθορίζεται από τη γεωμετρία του διηλεκτρικού και τις ιδιότητες της επιφάνειάς τους, από τη θέση λειτουργίας τους (κατακόρυφος, κεκλιμένη, οριζόντια, κτλ.) καθώς και από το περιβάλλον στο οποίο είναι εγκατεστημένοι (κλειστός χώρος, ύπαιθρος, παράκτια περιοχή, κτλ.) [9].

Οι μονωτήρες που είναι εγκατεστημένοι σε υπαίθριους χώρους υπόκεινται, κατά τη λειτουργία τους, σε σύνθετες και διαφορετικές μηχανικές, ηλεκτρικές και περιβαλλοντικές καταπονήσεις, σημαντικό μέρος των οποίων αποτελεί η άμεση και έμμεση επίδραση των καιρικών συνθηκών. Για το λόγο αυτό, αποτελούν αδύναμο κρίκο για τα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς βρίσκονται τοποθετημένοι σε όλο το μήκος του δικτύου, και η συμπεριφορά τους είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τις καταπονήσεις αυτές [38].

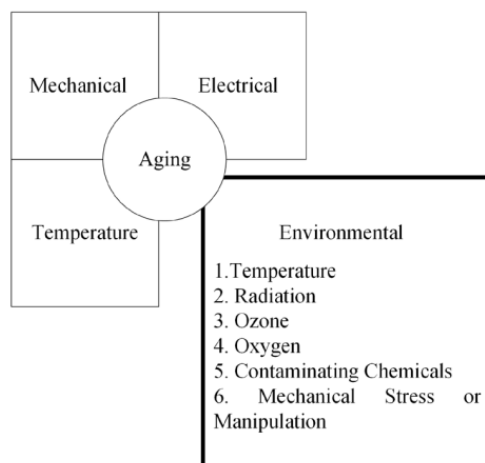
Οι ηλεκτρικές καταπονήσεις των μονωτήρων χωρίζονται σε μόνιμης και μεταβατικής κατάστασης. Η ηλεκτρική καταπόνηση μόνιμης κατάστασης αναφέρεται στην ονομαστική λειτουργία, ενώ η ηλεκτρική καταπόνηση μεταβατικής κατάστασης σε υπερτάσεις που οφείλονται σε κεραυνικά πλήγματα και χειρισμούς [33].



Σχήμα 2.1 Μεταβολή της επιφανειακής αντίστασης σε σχέση με την περιβάλλουσα υγρασία.

α: υαλώδη πορσελάνη, β: μη υαλώδη πορσελάνη [1]

Οι μηχανικές καταπονήσεις οφείλονται στις δυνάμεις που ασκούν οι εναέριοι αγωγοί. Αναλόγως των τοπικών περιβαλλοντικών συνθηκών στην περιοχή εγκατάστασης, οι μονωτήρες μπορούν να καταπονηθούν επιπλέον (καταπονήσεις μόνιμης κατάστασης) μηχανικά εξαιτίας της ταλάντωσης των εναέριων αγωγών από ανεμοπιέσεις ή επικάθιση πάγου.



Εικόνα 2.1. Γήρανση και είδη καταπονήσεων. [39]

Οι μονωτήρες όμως υπόκεινται σε μηχανικές καταπονήσεις μεταβατικής κατάστασης όπως για παράδειγμα η στρεπτική δύναμη που δέχονται από τους αγωγούς κατά την εγκατάστασή τους στα εναέρια δίκτυα μεταφοράς¹⁴. Οι περιβαλλοντικές

¹⁴ Στις μεταβατικές μηχανικές καταπονήσεις των μονωτήρων εντάσσονται και οι δυνάμεις που ασκούνται στο μονωτήρα κατά την υπερπήδηση του, καθώς και οι καταπονήσεις από απρόβλεπτες καταστάσεις

καταπονήσεις αναφέρονται στη γήρανση των μονωτήρων από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος σχετίζεται ανάλογα με την αγωγιμότητα των υλικών ενώ η έκθεση των πολυμερικών υλικών των συνθετικών μονωτήρων στην ηλιακή ακτινοβολία είναι αιτία υποβάθμισής τους λόγω της μεταβολής της χημικής τους σύστασης. Η υγρασία επιδρά στη μείωση της επιφανειακής αντίστασης του μονωτήρα (βλ. Σχήμα 2.1) ενώ η λειτουργία του σε μεγάλο υψόμετρο έχει ως αποτέλεσμα την εξασθένιση της επιφανειακής διηλεκτρικής αντοχής του λόγω της χαμηλής πυκνότητας του αέρα. Η λειτουργία του μονωτήρα σε περιοχές με αυξημένη ρύπανση σε συνδυασμό με την ατμοσφαιρική υγρασία έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της επιφανειακής αντοχής [40].

2.1.1 Μηχανισμοί γήρανσης των συνθετικών μονωτήρων

Με τον όρο γήρανση εννοείται η σταδιακή υποβάθμιση των ιδιοτήτων του υλικού. Παρά το γεγονός ότι το ελαστομερές σιλικόνης είναι ανθεκτικό, σε σχέση με άλλα συνθετικά μονωτικά περιβλήματα, σε πολλών ειδών καταπονήσεις όπως αυτές που περιγράφηκαν συνοπτικά παραπάνω, έχουν παρατηρηθεί φαινόμενα γήρανσης, με την παρέλευση του χρόνου λειτουργίας τους. Η έκταση και το είδος των φαινομένων γήρανσης διαφέρουν ανάλογα τον τύπο του μονωτήρα, με τον τόπο εγκατάστασης και λειτουργίας, τη συχνότητα και το είδος των καταπονήσεων κ.ο.κ. Ο μηχανισμός γήρανσης των συνθετικών μονωτήρων καθορίζεται κατά βάσει από τον τύπο του πολυμερούς υλικού, το ποσοστό των πρόσθετων προσμίξεων (fillers) που προστίθενται κατά τη διαδικασία κατασκευής τους, τα έτη και τις συνθήκες λειτουργίας, την ποιότητα, τις περιβαλλοντικές συνθήκες, τις συνθήκες εγκατάστασης, χειρισμού, κ.λ.π. [40].

Μερικές εκκενώσεις

Σε περιοχές του μονωτήρα που η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι σε υψηλά επίπεδα, αναπτύσσονται μερικές εκκενώσεις. Η παρουσία ρύπων ή/και νερού στην επιφάνεια ενός μονωτήρα που λειτουργεί υπό πραγματικές συνθήκες, μπορεί να

όπως οι σεισμοί, η σύγκρουση οχήματος σε πυλώνα ή στύλο και οι βανδαλισμοί λόγω πυροβολισμών. [40]

επιδεινώνει την κατάσταση ως προς το παραπάνω φαινόμενο: ο βαθμός ενίσχυσης του πεδίου εξαρτάται από την ποσότητα και την κατανομή του νερού, το είδος, την αγωγιμότητα και την κατανομή των ρύπων στην επιφάνεια του καλύμματος του μονωτήρα [7]. Κατά την ανάπτυξη των επιφανειακών μερικών εκκενώσεων το πολυμερικό περίβλημα καταπονείται από πλήθος μηχανισμών όπως βομβαρδισμό ηλεκτρονίων και ιόντων, UV ακτινοβολία καθώς επίσης και θερμικά φαινόμενα, με αποτέλεσμα τις δομικές μεταβολές του και κατά συνέπεια την υποβάθμιση κρίσιμων για την απόδοσή του ιδιοτήτων, όπως η υδροφοβικότητα [41] [42]. Οι μεταβολές αυτές σε συνδυασμό με τις υπάρχουσες ελεύθερες ρίζες στη δομή του PDMS μεταβάλλουν σταδιακά τη δομή του ελαστομερούς υλικού.

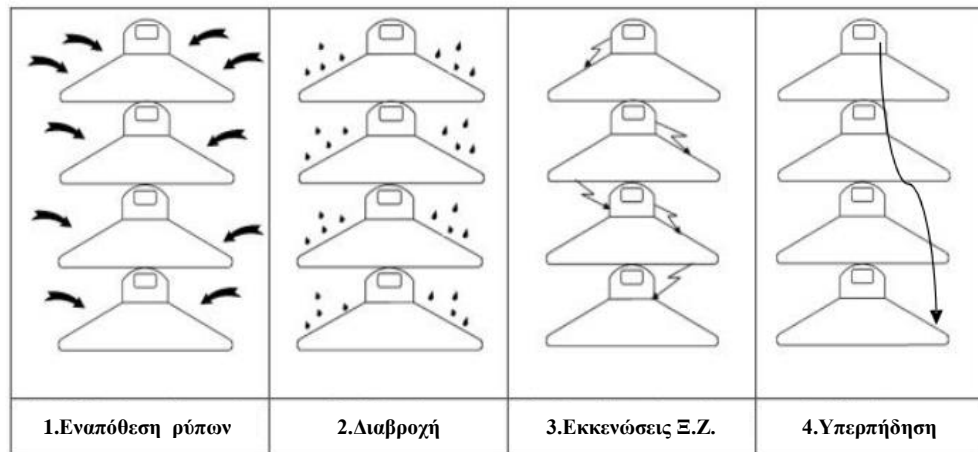
Υπεριώδης ακτινοβολία

Η υπεριώδης ακτινοβολία¹⁵ αποτελεί έναν από τους μηχανισμούς γήρανσης του πολυμερούς μέσω της φωτο-οξειδωσης, φαινόμενο το οποίο οδηγεί στο σχηματισμό μικρών ρωγμών στο πολυμερικό περίβλημα, επιτρέποντας την εισχώρηση υγρασίας στο εσωτερικό και εν τέλει κατάρρευση του μονωτήρα λόγω διάβρωσης. Η παρουσία της, στην επιφάνεια των μονωτήρων μέσης τάσης οφείλεται κατά κύριο λόγο στην πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας στο πολυμερικό τους περίβλημα. Σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, η παρουσία ρύπων στο περίβλημα του μονωτήρα μπορεί να περιορίσει την επίδραση της UV ακτινοβολίας μέχρι και 60%. [42] [43] Παρόλο που στο ελαστομερές σιλικόνης ο βαθμός μεταβολής των ιδιοτήτων του, είναι σχετικά περιορισμένος (συγκριτικά με τα EPR και EPDM), η υπεριώδης ακτινοβολία μπορεί να υποβοηθήσει στη διάσπαση των δεσμών Si-C και C-H, αποσπώντας πλευρικά μεθύλια ή άτομα υδρογόνου. Έχει καταγραφεί μεταβολή της σύστασης της επιφάνειας του υλικού σιλικόνης καθώς και μείωση της υδροφοβικότητάς του λόγω της διάσπασης των πλευρικών μεθυλίων, μετά από έκθεση σε μεγάλης έντασης υπεριώδους ακτινοβολίας [44].

Εκκενώσεις ξηράς ζώνης (dry band arcing)

¹⁵ Η υπεριώδης ακτινοβολία αποτελεί τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, με μήκη κύματος από τα 15nm (ακτίνες X) μέχρι τα 400nm (ιώδες φως). Το μήκος κύματος της υπεριώδους ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της Γης κυμαίνεται μεταξύ 290 nm και 350 nm [94].

Η εμφάνιση ξηρών ζωνών στα μονωτικά συνθετικά υλικά είχε ήδη καταγραφεί από τα πρώτα στάδια εφαρμογής τους [45] και επιβεβαιώθηκε αργότερα σε εργαστηριακές αλλά και σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Οι εκκενώσεις ξηράς ζώνης εμφανίζονται στο ελαστομερές περίβλημα του μονωτήρα όταν οι υδροφοβικές ιδιότητες έχουν μειωθεί κατά μεγάλο ποσοστό, και σχετίζονται με εξαιρετικά μεγάλες τιμές ρεύματος διαρροής και θερμοκρασίες άνω των 250°C.



Εικόνα 2.2 Βασικά στάδια δημιουργίας των εκκενώσεων ξηράς ζώνης και της υπερπήδησης στους υπαίθριους μονωτήρες [46]

Η καταπόνηση επομένως που υφίσταται το υλικό είναι κατά βάση θερμική (προσφορά ενέργειας στο υλικό) και μπορεί να προκαλέσει σταδιακή διάβρωση του περιβλήματος και σχηματισμό αγώγιμων οδούσεων άνθρακα (βλ. υποσημείωση 10). Συγκεκριμένα, στο σώμα του ελαστομερούς λαμβάνουν χώρα χημικές αντιδράσεις διάσπασης και αντικατάστασης της μοριακής αλυσίδας, καθώς και αντιδράσεις οξείδωσης και υδρόλυσης [34].

Περιβαλλοντικοί παράγοντες

Το νερό ως αυτόνομο στοιχείο λειτουργεί ως διαλύτης σε αρκετές διαδικασίες γήρανσης ή μέσο μεταφοράς άλλων στοιχείων στο σώμα του μονωτήρα:

- Η ρόφηση νερού από στερεά υδρόφοβα ελαστομερή, όπως είναι το PDMS, μπορεί να οδηγήσει σε δραστική υποβάθμιση των μηχανικών και ηλεκτρικών (μονωτικών) ιδιοτήτων τους [26]. Επίσης η παρουσία μορίων νερού στην επιφάνεια μπορεί να επιβάλλει τον αναπροσανατολισμό των πλευρικών

μεθυλίων προς το εσωτερικό του υλικού, με αποτέλεσμα την απώλεια της υδροφοβίας [30]. Και βέβαια, η εισχώρηση νερού στον πυρήνα του μονωτήρα (σε περιπτώσεις κατασκευαστικής ατέλειας) έχει καταστροφικές συνέπειες για τις μηχανικές ιδιότητες του.

- Στην περίπτωση της όξινης βροχής μεταφέρει νιτρικά και θειικά οξέα στο περιβλήμα του μονωτήρα. Η όξινη βροχή έχει αποδειχθεί εργαστηριακά ότι προκαλεί διάβρωση της επιφάνειας του πολυμερούς, κυρίως λόγω της μείωσης της συγκέντρωσης της ένυδρης αλουμίνας (ATH) και των πλευρικών μεθυλίων, με αποτέλεσμα τη μείωση της υδροφοβικότητας. Το ποσοστό της διάβρωσης εξαρτάται από τη σύνθεσή της [47].
- Με τη συνδρομή της υψηλής υγρασίας επίσης, μπορούν να επικαθίσουν και να αναπτυχθούν στο σώμα του μονωτήρα βακτήρια και άλγη τα οποία συμβάλλουν στη διάβρωση και τον αποχρωματισμό, ενώ δυσχεραίνουν την αποστράγγιση του νερού της βροχής [19].

Τέλος, η θερμοκρασία και ο άνεμος είναι δύο καταλυτικοί παράγοντες σταδιακής γήρανσης του περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων. Ο άνεμος, όπως περιγράφεται και στην επόμενη ενότητα, συμβάλλει έμμεσα στην μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του ελαστομερούς με την μεταφορά και εναπόθεση στέρεων και διαλυτών ρύπων πάνω στο σώμα του. Η υψηλή θερμοκρασία, όπως έχει ήδη αναφερθεί, οφείλεται στην επιφανειακή ηλεκτρική δραστηριότητα του μονωτήρα αλλά κυρίως στην αυξημένη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Αποτελεί αιτία απώλειας των στοιχείων χαμηλού μοριακού βάρους με συνέπεια τη μείωση της υδροφοβικότητας της επιφάνειας αλλά και διάβρωση του ελαστομερούς (ειδικά όταν αυτό είναι χαμηλής συγκέντρωσης σε βελτιωτικές προσμίξεις) [40].

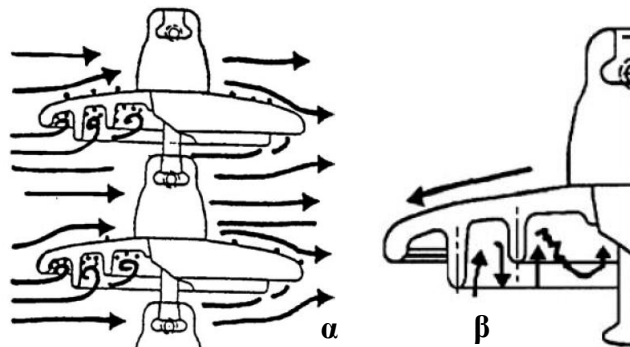
2.2 Ρύπανση των μονωτήρων

Ο κύριος παράγοντας που επιδρά στην συμπεριφορά των μονωτήρων κατά τη λειτουργία τους είναι η *ρύπανση*, όρος ο οποίος χρησιμοποιείται για να περιγράψει την υποβάθμιση των μονωτικών χαρακτηριστικών του περιβλήματος των μονωτήρων λόγω εναπόθεσης εν δυνάμει αγωγίμων σωματιδίων στην επιφάνεια του [38].

Πηγές ρύπανσης αποτελούν: η υδατονέφωση άλατος και η όξινη βροχή το χειμώνα, η άμμος, σωματίδια σκόνης και χώματος κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού,

βιομηχανικοί ρύποι και καυσαέρια κ.α. Η ένταση του προβλήματος της ρύπανσης συσχετίζεται έντονα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής στην οποία οι μονωτήρες είναι εγκατεστημένοι, και ειδικά με τη δραστηριότητα του ανέμου, η οποία είναι ο βασικός μηχανισμός μεταφοράς και εναπόθεσης ρύπων στην επιφάνειά τους και τη βροχόπτωση η οποία αποτελεί τον κύριο μηχανισμό καθαρισμού τους. [48]

Η ταχύτητα συσσώρευσης εξαρτάται από την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου, το μέγεθος των σωματιδίων, το υλικό και το σχήμα του μονωτήρα. Επίσης, στον προσανατολισμό των μονωτήρων οφείλεται η κατανομή των επιφανειακών ρύπων. Σε κεραμικούς μονωτήρες οι περισσότεροι ρύποι εναποτίθενται μεταξύ των πτυχώσεων του μονωτήρα λόγω του στροβιλισμού του αέρα σε αυτές τις περιοχές (βλ. Εικόνα 2.3 α) ενώ στους συνθετικούς εγγύτερα στον πυρήνα. Μόλις επιφανειακά συμπυκνώματα/υγρασία (ομίχλη, πάχνη, κτλ.) έρθουν σε επαφή με τη ρυπασμένη επιφάνεια σχηματίζεται ένα αγωγίμο στρώμα το οποίο διαρρέεται από ρεύματα διαρροής [9]. Το ρεύμα διαρροής στεγνώνει την επιφάνεια και αυξάνει την αντίσταση στην επιφάνεια δημιουργώντας ξηρές ζώνες.



Εικόνα 2.3 α) Εναπόθεση ρύπων σε μονωτήρες ανάρτησης τύπου cap & pin β) Εκκενώσεις ξηρής ζώνης [49]

Οι συνθετικοί μονωτήρες έχουν καλύτερη συμπεριφορά στη ρύπανση λόγω των υδροφοβικών ιδιοτήτων του υλικού του περιβλήματός τους. Ο μηχανισμός εναπόθεσης ρύπων είναι παρόμοιος με των κεραμικών μονωτήρων. Ωστόσο, οι συνθετικοί μονωτήρες δεν παρουσιάζουν σοβαρή απώλεια των ιδιοτήτων τους (όπως συμβαίνει με τους κεραμικούς) λόγω του φαινομένου της μεταφοράς της υδροφοβίας (βλ. υποενότητα 2.3.1.1). Ως εκ τούτου, σε ένα συνθετικό μονωτήρα με περίβλημα σιλικόνης διαπιστώνεται ότι η υδροφοβία μπορεί να μεταφερθεί στη ρυπασμένη επιφάνεια του μονωτήρα. Η μεταφορά (και η ανάκτηση της υδροφοβίας π.χ. μετά από ηλεκτρικές εκκενώσεις) αποδίδεται στην ανάδυση στοιχείων χαμηλού μοριακού βάρους

από το εσωτερικό υλικό στο υλικό της επιφάνειας του πολυμερικού περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων.

Η αξιολόγηση των επιπέδων ρύπανσης της εξωτερικής επιφάνειας των μονωτήρων και η παρακολούθηση του φαινομένου της ρύπανσης γίνεται με διάφορες μεθόδους: με μέτρηση της επιφανειακής αντίστασης (superficial resistance) ή αγωγιμότητας, με καταγραφή της καταπόνησης υπερπήδησης, με μέτρηση της πυκνότητας επικαθίσης ισοδύναμης ποσότητας άλατος ή της πυκνότητας επικαθίσης μη διαλυτών ρύπων και (από τις περισσότερο αποδοτικές μεθόδους) με μέτρηση του ρεύματος διαρροής (LC) [50].

Επίπεδο ρύπανσης	Παραδείγματα αντιπροσωπευτικών περιοχών	Ελάχιστο μήκος ερπυσμού (mm/kV)
I -Ελαφριά	<ul style="list-style-type: none"> ~ Περιοχές χωρίς βιομηχανίες και μικρή πυκνότητα κατοικιών που διαθέτουν καυστήρες ~ Περιοχές με μικρή πυκνότητα βιομηχανιών ή κατοικιών, οι οποίες υφίστανται ανέμους ή/και συχνές βροχοπτώσεις ~ Αγροτικές περιοχές ~ Ορεινές περιοχές ~Οι περιοχές αυτές θα πρέπει να απέχουν τουλάχιστον 10-20 km από τη θάλασσα και να μην εκτίθενται σε ανέμους από αυτή. 	16
II - Μεσαία	<ul style="list-style-type: none"> ~ Περιοχές με βιομηχανίες που δεν παράγουν ιδιαίτερα επιβαρυντικούς αέριους ρύπους και με μεσαία πυκνότητα κατοικιών που διαθέτουν καυστήρα ~ Περιοχές με μεγάλη πυκνότητα κατοικιών και/ή βιομηχανιών που όμως υφίστανται συχνά ανέμους και/ή βροχοπτώσεις ~ Περιοχές εκτεθειμένες σε θαλάσσιους ανέμους αλλά όχι πολύ κοντά στην ακτή 	20
III - Βαριά	<ul style="list-style-type: none"> ~ Περιοχές με μεγάλη πυκνότητα βιομηχανιών και προάστια μεγάλων πόλεων με μεγάλη πυκνότητα καυστήρων ~ Περιοχές κοντά στη θάλασσα ή σε κάθε περίπτωση εκτεθειμένες σε σχετικά ισχυρούς ανέμους από αυτή 	25
IV - Πολύ βαριά	<ul style="list-style-type: none"> ~ Περιοχές μέτρια έκτασης, εκτεθειμένες σε αγωγίμους ρύπους και βιομηχανικό καπνό που δημιουργεί αγωγίμες επικαθίσεις μεγάλου πάχους ~ Περιοχές μέτριας έκτασης, πολύ κοντά στις ακτές και εκτεθειμένες στον αφρό των κυμάτων ή πολύ ισχυρούς ανέμους από τη θάλασσα ~ Ερημικές περιοχές, χωρίς βροχόπτωση για μεγάλες περιόδους, εκτεθειμένες σε ισχυρούς ανέμους που μεταφέρουν άμμο και αλάτι σε μεγάλες συγκεντρώσεις 	31

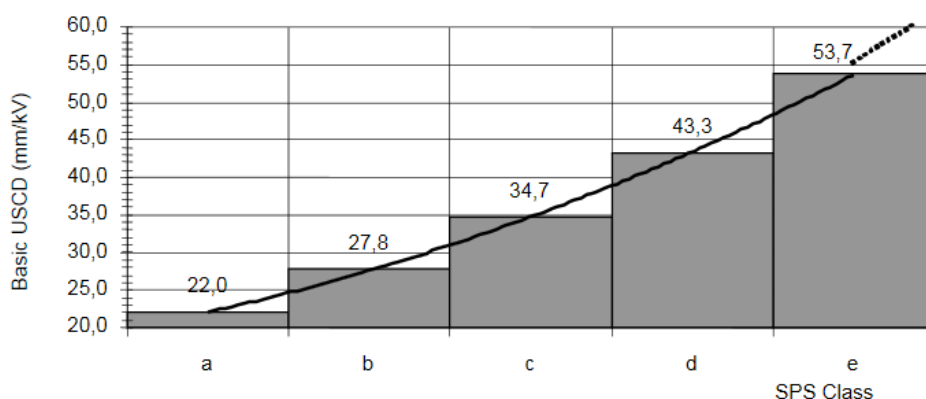
Πίνακας 2.1 Χαρακτηρισμός επιπέδων ρύπανσης κατά IEC και προτεινόμενο μήκος ερπυσμού

σε mm/kV [51].

Το πρότυπο IEC 60507/1991 [52] καθορίζει την μονωτική ικανότητα των κεραμικών μονωτήρων σε συνθήκες ρύπανσης ενώ η επιλογή του κατάλληλου τύπου μονωτήρα και η διαστασιολόγησή του γίνεται πλέον βάσει του προτύπου IEC 60815/2008 [53] , όπου δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στις συνθήκες ρύπανσης της περιοχής εγκατάστασης. Σύμφωνα με το IEC 60815-1/2008 [54] υπάρχουν δύο βασικοί τύποι ρύπανσης [54]:

- Η ρύπανση *τύπου Α* η οποία αφορά μη διαλυτούς ρύπους που συναντώνται σε περιοχές της ενδοχώρας, περιοχές ερήμου ή βιομηχανικές και μπορούν να γίνουν αγωγάιμοι σε συνδυασμό με υγρασία. Εκφράζεται δε μέσω της πυκνότητας επικάθισης ισοδύναμης ποσότητας άλατος (ESDD) ή της πυκνότητας επικάθισης μη διαλυτών ρύπων (NSDD) και
- Η ρύπανση *τύπου Β* η οποία συνδέεται συνήθως με παράκτιες περιοχές όπου το θαλασσινό νερό ή η αγωγίμη ομίχλη (υγροί ηλεκτρολύτες) εναποτίθενται στην επιφάνεια του μονωτήρα. Εκφράζεται μέσω της επιφανειακής αγωγιμότητας.

Η πυκνότητα επικάθισης ισοδύναμης ποσότητας άλατος (ESDD) εκφράζει (σε mg/cm²) την ποσότητα χλωριούχου νατρίου (NaCl) η οποία διαλυμένη σε απιονισμένο νερό, δίνει την ίδια αγωγιμότητα με εκείνη της φυσικής εναπόθεσης ρύπου που συλλέγεται από μια δεδομένη επιφάνεια του μονωτήρα διαιρούμενη με το εμβαδό αυτής της επιφάνειας. Η πυκνότητα επικάθισης μη διαλυτών ρύπων (NSDD) εκφράζει (σε mg/cm²) την ποσότητα στερεού υπολείμματος που αφαιρείται από μια δεδομένη επιφάνεια του μονωτήρα διαιρεμένη με το εμβαδό της επιφάνεια αυτής [54].

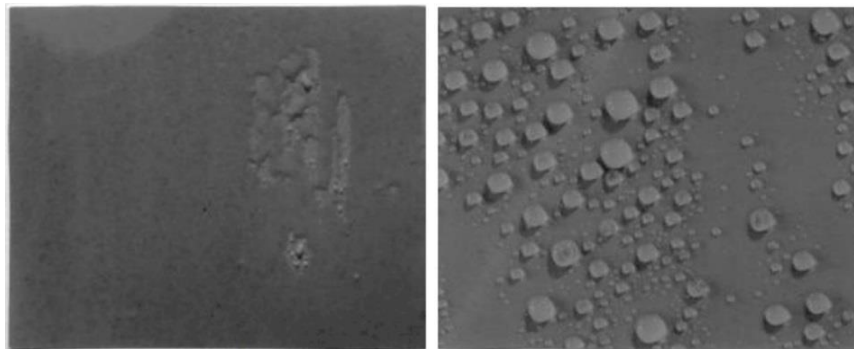


Σχήμα 2.2 Το ελάχιστο μοναδιαίο ειδικό μήκος ερπυσμού μετρούμενο σε mm/kV (φασική τάση) ανά επίπεδο ρύπανσης για συνθετικούς μονωτήρες σύμφωνα με την τεχνική οδηγία IEC 90815-3/2008. Διαβάθμιση ρύπανσης της περιοχής: a) πολύ ελαφριά, b) ελαφριά, c) μεσαία, d) βαριά, e) πολύ βαριά [53]

Για την προσομοίωση της ρύπανσης τύπου Α, ο μονωτήρας με επιφανειακή επικάλυψη στεγνού στρώματος ρύπων δοκιμάζεται σε θάλαμο υδατονέφωσης ενώ για την προσομοίωση της ρύπανσης τύπου Β οι δοκιμές διεξάγονται σε θάλαμο υδατονέφωσης άλατος και ο μονωτήρας εκτίθεται σε διάλυμα καθορισμένης αγωγιμότητας. Το IEC 60815-1/2008 για λόγους τυποποίησης, ορίζει ποιοτικά πέντε επίπεδα ρύπανσης (βλ. Σχήμα 2.2) που χαρακτηρίζουν τη σοβαρότητα της ρύπανσης του πεδίου, από πολύ ελαφριά έως πολύ βαριά ρύπανση. Τα επίπεδα αυτά δεν αντιστοιχούν άμεσα στα επίπεδα του προτύπου IEC 60815/1986¹⁶ [53].

2.3 Υδροφοβικότητα

Η υδροφοβία σε ένα υλικό ορίζεται ως η αντίδρασή του στην επικάθιση και στη ροή του νερού στην επιφάνειά του. Ένα υλικό χαρακτηρίζεται ως εξαιρετικά υδρόφοβο (έχει υδατοαπωθητικές ιδιότητες) αν αντιστέκεται στη ροή του νερού που πέφτει σε αυτό και ως λιγότερο υδρόφοβο (έχει υδροφιλικές ιδιότητες) εάν το νερό ρέει σε μορφή διαδρομών στην επιφάνεια του. Όταν μια σταγόνα υγρού έλθει σε επαφή με την επιφάνεια ενός υλικού, τότε παρατηρείται η αντίρροπη δράση δύο μηχανισμών δυνάμεων.



Εικόνα 2.4 Υδρόφιλη επιφάνεια (αριστερά) υψηλής εσωτερικής ενέργειας και υδρόφοβη επιφάνεια (δεξιά) [67]

¹⁶ Η πρώτη τεχνική οδηγία 815 δημοσιεύθηκε από το IEC το 1986 με βάση τη γνώση και την εμπειρία προηγούμενων δεκαετιών, στη συμπεριφορά των μονωτήρων. Η οδηγία αφορούσε αρχικά τους πορσελάνινους μονωτήρες στήριξης και διελεύσεως, ενώ αργότερα επεκτάθηκε για να καλύψει τους κεραμικούς μονωτήρες ανάρτησης τύπου cap & pin. Πολλές από τις βασικές πληροφορίες στην οδηγία σχετικά με τους τύπους και τα επίπεδα ρύπανσης ισχύουν για νεότερα διηλεκτρικά υλικά (π.χ. συνθετικά) όμως κατά βάση, η συγκεκριμένη οδηγία πρέπει να εφαρμόζεται μόνο στους παραπάνω τύπους μονωτήρων.

Από τη μια πλευρά η επιφανειακή τάση η οποία ουσιαστικά αποτελεί έκφραση της εσωτερικής ενέργειας της δομής του υλικού, τείνει να αυξήσει την καλυπτόμενη επιφάνεια από την σταγόνα, προκαλώντας ουσιαστικά την εξάπλωση της, και από την άλλη οι δυνάμεις συνοχής που διέπουν τη σταγόνα, τείνουν να μειώσουν την ελεύθερη επιφάνεια της [30].

Στην περίπτωση ενός υλικού με ισχυρή εσωτερική δομή, όπως η πορσελάνη και το γυαλί, παρατηρείται εξάπλωση της σταγόνας και διαβροχή μεγάλης επιφάνειας υλικού. Αντίθετα, στα πολυμερή υλικά, η ενέργεια που αναπτύσσεται στην επιφάνεια, όπως εκφράζεται από την επιφανειακή τάση, δεν αρκεί για να υπερνικήσει τις δυνάμεις συνοχής της σταγόνας και έτσι δεν παρατηρείται κάλυψη της επιφάνειας από στρώμα υγρού [43].

2.3.1 Η υδροφοβικότητα στους συνθετικούς μονωτήρες μέσης τάσης

Η υδροφοβικότητα ενός υλικού εν γένει οφείλεται στα χαμηλά επίπεδα της επιφανειακής ενέργειας του. Τα ελαστομερή σιλικόνης, χαρακτηρίζονται από μια ισχυρή δομή μοριακής αλυσίδας, εξαιτίας της ύπαρξης του δεσμού πυριτίου οξυγόνου (SiO), της οποίας οι ιδιότητες δεν εκδηλώνονται στην επιφάνεια, αλλά καλύπτονται από ομάδες πλευρικών μεθυλίων [55].

Υλικό	Επιφανειακή Τάση (mN/m)
Πορσελάνη	366
Γυαλί	170
Epoxy Resins	35
Polyethylene	33
EP Rubbers	31
Polypropylene	29
PDMS	23
PTFE	19

Πίνακας 2.2. Επιφανειακή τάση μονωτικών υλικών [30], [43]

Η συμπεριφορά αυτή αποτελεί συνέπεια του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής [43]: Δεδομένου ότι τα συστήματα αλλάζουν για να ελαχιστοποιήσουν την ελεύθερη ενέργεια τους, είναι σαφές ότι το συστατικό που μειώνει περισσότερο την επιφανειακή ενέργεια μιας επιφάνειας τείνει να συσσωρεύεται σε αυτήν την επιφάνεια.

Εν προκειμένω για το PDMS οι ομάδες των πλευρικών μεθυλίων συσσωρεύονται στην επιφάνεια του υλικού (κυριαρχώντας στην ισχυρή εσωτερική δομή των δεσμών σιλοξάνης) και εν τέλει καθορίζουν την ισχύ των δια-μοριακών δυνάμεων. Η ευελιξία της μοριακής αλυσίδας¹⁷ και οι ασθενείς δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των μορίων του PDMS διευκολύνουν τη διαδικασία αυτή. Το αποτέλεσμα είναι τα πολύ χαμηλά επίπεδα επιφανειακής ενέργειας [55].

2.3.1.1 Μεταφορά της υδροφοβικότητας

Κατά τη λειτουργία των μονωτήρων σε πραγματικές συνθήκες, είναι θέμα χρόνου η επικάλυψη στο συνθετικό περίβλημα επιφανειακών υδρόφιλων ρύπων, οι οποίοι μπορούν να υποβαθμίσουν τις υδροφοβικές του ιδιότητες [41]. Το πιο προφανές μειονέκτημα της μείωσης ή της απώλειας της υδροφοβικότητας στην επιφάνεια των κυαθίων των συνθετικών μονωτήρων είναι η αύξηση της δραστηριότητας επιφανειακών ρευμάτων διαρροής με αποτέλεσμα, την αύξηση ξηρότητάς της. Υπάρχει σαφής συσχέτιση μεταξύ της μείωσης της υδροφοβικότητας με την τοπική ενίσχυση του ηλεκτρικού πεδίου [56].

Ένα από πιο σημαντικά πλεονεκτήματα του ελαστομερούς σιλικόνης είναι η δυνατότητα μεταφοράς των υδροφοβικών ιδιοτήτων του στην ρυπασμένη επιφάνεια μέσω του μηχανισμού διάχυσης μορίων χαμηλού μοριακού βάρους (Low Molecular Weight) από τον πυρήνα του υλικού προς την επιφάνεια. Τα μόρια χαμηλού μοριακού βάρους υπάρχουν στη μάζα του υλικού, ήδη από την διαδικασία του πολυμερισμού. Λόγω των ασθενών διαμοριακών δυνάμεων και της μεγάλης κινητικότητάς τους, αναδύονται στην επιφάνεια και απορροφώνται από το (μεγαλύτερης επιφανειακής ενέργειας) στρώμα των ρύπων, μεταβάλλοντας την συμπεριφορά τους σε υδροφοβική.

Οι παράγοντες οι οποίοι επιδρούν στο μηχανισμό μεταφοράς της υδροφοβικότητας είναι – μεταξύ άλλων - η σύσταση του υλικού σιλικόνης, η περιεκτικότητα, η σύσταση των συστατικών πλήρωσης, το πάχος του υλικού σιλικόνης, οι συνθήκες βουλκανισμού και η γήρανσή του [40]. Η ταχύτητα ανάκτησης της υδροφοβικότητας είναι ευθέως ανάλογη με την ποσότητα των μορίων χαμηλού

¹⁷ Η μοριακή αλυσίδα του PDMS χαρακτηρίζεται από μεγάλη κινητικότητα και ευελιξία (4kJ/mol), μέσα στον όγκο του υλικού. Το γεγονός αυτό συνδράμει τα μέγιστα στον προσανατολισμό των πλευρικών μεθυλίων προς την επιφάνεια του υλικού, με αποτέλεσμα την μείωση της επιφανειακής ενέργειας του [89].

μοριακού βάρους που απομένει εντός του όγκου του ελαστομερούς, βάσει του νόμου της διάχυσης¹⁸. αλλά εξαρτάται και από το είδος των επιφανειακών ρύπων. Επίσης, η προσθήκη στο μείγμα, μικροσφαιριδίων γυαλιού αντί της ATH ως ενισχυτικό πρόσθετο (filler) κυρίως σε υγρά ελαστομερή σιλικόνης (Liquid Silicone Rubber) μπορεί να μειώσει τη δέσμευση των στοιχείων χαμηλού μοριακού βάρους την οποία η ATH προκαλεί, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη ταχύτητα μεταφοράς της υδροφοβίας [36]. Η υπεριώδης ακτινοβολία και η αυξημένη θερμοκρασία μπορεί να επιταχύνουν τη διαδικασία διάχυσης των LMW στο στρώμα ρύπανσης [55]. Μάλιστα, η ταχύτητα μεταφοράς της υδροφοβικότητας μειώνεται σε μεγάλο βαθμό σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας, ανεξάρτητα από το είδος των ρύπων. Έχει αποδειχθεί ότι η ταχύτητα της μεταφοράς υδροφοβικότητας μειώνεται εμφανώς αναλογικά με το χρόνο έκθεσης του μονωτήρα στο περιβάλλον [43] [55]. Αυτό οφείλεται στην απομάκρυνση από το νερό της βροχής των μορίων χαμηλού μοριακού βάρους μαζί με το στρώμα ρύπων το οποίο έχει αποκτήσει ήδη υδροφοβικές ιδιότητες. Τέλος, η ιδιότητα μεταφοράς υδροφοβίας του HTV SiR επηρεάζεται αρνητικά από τη σχετική υγρασία του αέρα. Η επίδραση της υγρασίας σχετίζεται με την υγροσκοπικότητα διαλυτών και μη διαλυτών ουσιών στους ρύπους. Όσο υψηλότερη είναι η υγροσκοπικότητα, τόσο πιο αργή είναι η μεταφορά υδροφοβίας [57].

2.4 Μάζα και Πυκνότητα

Λόγω της σχέσης (2.1) μεταξύ μάζας, όγκου (διαστάσεων) και πυκνότητας (η πυκνότητα μπορεί να υπολογιστεί από τη γνώση της μάζας και των διαστάσεων), τα δεδομένα αυτά συχνά ομαδοποιούνται και χρησιμοποιούνται ως υπόβαθρο άλλων φυσικών δοκιμών. Για παράδειγμα, η πυκνότητα χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απώλειας όγκου σε δοκιμές γήρανσης ή ως βασικό μέρος σε μετρήσεις αλλαγής όγκου. Γενικά, οι περισσότερες πειραματικές μέθοδοι σε κάποιο σημείο τους περιλαμβάνουν τη μέτρηση των διαστάσεων του δοκιμίου ενώ σε πολλές δοκιμές η μάζα αποτελεί μια από τις βασικές παραμέτρους. Τόσο στο εργαστήριο όσο και στο

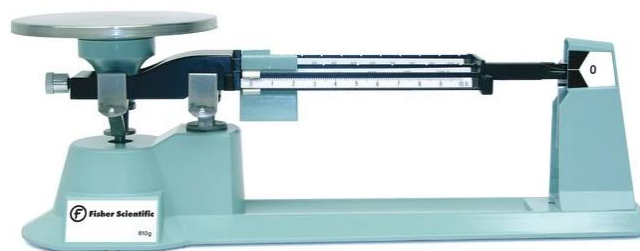
¹⁸ Οι νόμοι του Fick περιγράφουν την τάση να διαμορφωθεί μια ομογενής κατανομή στο χώρο. Γενικά, όταν η συγκέντρωση ύλης δεν είναι ομοιόμορφη σε ένα χώρο, τότε αυτή ρέει σε αυτόν τον χώρο. Το αποτέλεσμα της ροής είναι να μεταβάλλεται η συγκέντρωση μέχρις ότου να δημιουργηθεί μια δυναμική ισορροπία.

εργοστάσιο, η μέτρηση πυκνότητας και διαστάσεων του προϊόντος έχουν μια διακεκριμένη θέση λόγω της συχνής χρήσης τους αφού αποτελούν όχι μόνο βασικές συνιστώσες για την τελική κοστολόγηση του τελικού προϊόντος μιας γραμμής παραγωγής, αλλά και ένα πρωτογενές κριτήριο ελέγχου της ποιότητάς του [58].

Αναφορικά με τους συνθετικούς μονωτήρες, η πυκνότητα χρησιμοποιείται πολύ συχνά ως μια απλή αλλά αποτελεσματική παράμετρος ελέγχου ποιότητας σε παρτίδες μονωτήρων με ελαστομερές περίβλημα ή/και ως δικλείδα ασφαλείας για αποφυγή μεγάλων σφαλμάτων ενώ και οι διαστατικοί έλεγχοι αποτελούν μια από τις πιο συνηθισμένες μεθόδους επιθεώρησης τους [58]. Η πυκνότητα παρέχει επίσης πληροφορίες σχετικά με την περιεκτικότητα της πρόσθετης πρόσμιξης σε σχέση με το βασικό πολυμερές [8].

Η μάζα μετράται ζυγίζοντας το εν λόγω αντικείμενο χρησιμοποιώντας κατάλληλη ζυγαριά. Αναλόγως το αντικείμενο που θα πρέπει να ζυγιστεί, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί και το αντίστοιχο όργανο ζύγισης, αφού κάθε είδος ζυγού μετράει τη μάζα με διαφορετικό τρόπο. Η ζύγιση, επί παραδείγματι, με ζυγαριά ισορροπίας (beam balance) αποτελεί ουσιαστικά διαδικασία σύγκρισης μεταξύ μαζών, ενώ η ζύγιση με ζυγαριά ελατηρίου μετρά δύναμη [58].

Τα πρότυπα δοκιμών για τα ελαστομερή, εκτός από την ακρίβεια της ένδειξης, συνήθως δεν αναφέρουν άλλες λεπτομέρειες για το όργανο ζύγισης που πρέπει να χρησιμοποιείται, και έτσι συνήθως χρησιμοποιούνται οι εργαστηριακές ζυγαριές. [58]



Εικόνα 2.5 Σύγχρονη ζυγαριά ισορροπίας [59]

Η πυκνότητα ορίζεται ως μάζα ανά μονάδα όγκου, ενώ η σχετική πυκνότητα είναι η μάζα της υπό μέτρηση ουσίας σε σύγκριση με τη μάζα ίσου όγκου μιας ουσίας αναφοράς (συνήθως του νερού).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

Στην πράξη, η μέθοδος μέτρησης συχνά περιλαμβάνει την εύρεση της σχετικής πυκνότητας στο νερό. Επιπλέον, ο προσδιορισμός γίνεται συχνά με συνυπολογισμό των βαρυτικών δυνάμεων, όπου για ευκολία οι δυνάμεις εκφράζονται σε μονάδες μάζας.

Η πυκνότητα ενός σώματος επηρεάζεται από τις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης λόγω μεταβολής του όγκου. Στην περίπτωση των υγρών η πυκνότητα επηρεάζεται μόνο από την θερμοκρασία. Γι' αυτό η πυκνότητα ενός υγρού πρέπει να αναφέρεται σε ορισμένη θερμοκρασία. Η εύρεση της πυκνότητας των υγρών είναι δυνατόν να γίνει με μεθόδους που στηρίζονται στη μέτρηση της μάζας ή του βάρους ορισμένου όγκου του υγρού ή στην εύρεση της άνωσης. Στην πρώτη περίπτωση ανήκει η μέθοδος της ληκύθου, ενώ στην δεύτερη στηρίζεται η μέθοδος των εμβαπτιζόμενων πυκνομέτρων και αραιομέτρων καθώς και η μέθοδος με τον ζυγό των Mohr-Westphal [60].

2.4.1 Ομογενοποίηση

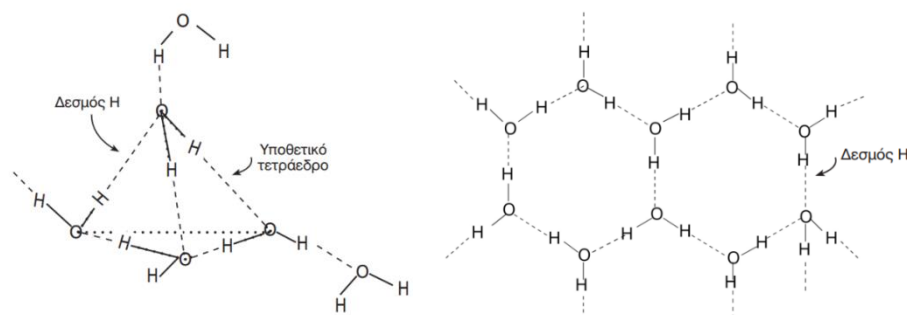
Τα περισσότερα μίγματα (blends) πολυμερών είναι μορφολογικά ετερογενή [28]. Σε αντίθεση με τα αέρια τα οποία είναι αναμίξιμα σε όλες τις αναλογίες σε χαμηλές πιέσεις, τα υγρά διαλύματα εμφανίζουν συχνά μερική αναμιξιμότητα τουλάχιστον σε ορισμένο εύρος θερμοκρασίας και σύστασης [61]. Πρόκειται για μίγματα των οποίων τα συστατικά χωρίζονται σε χωρικά διακριτούς τομείς (φάσεις) το μέγεθος των οποίων κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες νανόμετρα έως μερικά μικρόμετρα και συνήθως η δυναμική συμπεριφορά των τομέων είναι ουσιαστικά η ίδια με εκείνη των πρωτογενών υλικών τα οποία τους αποτελούν. Ωστόσο, μίγματα χαμηλής αναμιξιμότητας μπορούν να αποδώσουν νέες και χρήσιμες μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες, υπό προϋποθέσεις, και συνήθως οι νέες ιδιότητες είναι ο «μέσος όρος» των ιδιοτήτων των πρωτογενών συστατικών. Μια σημαντική μεταβλητή στα ετερογενή μίγματα είναι η χωρική κατανομή σταυροειδών δεσμών, πληρωτικών (fillers), σταθεροποιητών κ.λπ. [28] Μάλιστα, η κατανομή των σταυροειδών δεσμών αποτελεί μείζον πρόβλημα σε ετερογενή μίγματα αφού η ομοιόμορφη διασύνδεση προσδίδει

γενικά τις καλύτερες ιδιότητες, ενώ οι σοβαρές ανισοροπίες οδηγούν σε υποβάθμιση των ιδιοτήτων του υλικού [28].

Η βελτίωση της μεταξύ των συστατικών του μείγματος συμβατότητας έχει ως αποτέλεσμα μικρότερες και/ή περισσότερες διασυνδεδεμένες φάσεις, γεγονός το οποίο μπορεί δυνητικά να βελτιώσει τις ιδιότητες του. Μπορεί να επιτευχθεί δε, με τη χρήση διαλυτών μέσων συμβατότητας, όπως οι ομογενοποιητές ή μέσω χημικής τροποποίησης των συστατικών. Οι ομογενοποιητές (compatibilizers) είναι επιφανειοδραστικά υλικά που τροποποιούν την επιφανειακή τάση για να μειώσουν το μέγεθος των φάσεων. Γενικά, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις στο διάλυμα των ουσιών αυτών έχει ως αποτέλεσμα μικρότερα μεγέθη διακριτών τομέων. Ελαστομερή τα όποια υπόκεινται σε χημική τροποποίηση για την επίτευξη καλύτερης ομοιογένειας συνήθως είναι το EPDM και η πολυδιμεθυλοσιλοξάνη. Αντίστοιχα βοηθητικά μέσα κατά τη δημιουργία του μίγματος είναι οι πλαστικοποιητές οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη μείωση της αντίστασης στη ροή των πολυμερών μειώνοντας το ιξώδες του μίγματος [28].

2.4.2 Πυκνότητα του νερού

Ο σχηματισμός του βασικού μορίου του νερού (H_2O) οφείλεται σε 2 ομοιοπολικούς δεσμούς μεταξύ 2 ατόμων υδρογόνου και ενός ατόμου οξυγόνου. Λόγω της δομής του το μισό μόριο νερού έχει περίσσεια αρνητικού φορτίου και το άλλο μισό περίσσεια θετικού φορτίου. Έτσι, το νερό συμπεριφέρεται σαν δίπολο.



Εικόνα 2.6 Τετραεδρική διάταξη των μορίων του νερού (αριστερά) και διάταξη του κρυσταλλικού πλέγματος των μορίων του πάγου (δεξιά) [95]

Συνέπεια της ύπαρξης δεσμών υδρογόνου μεταξύ των μορίων του νερού αποτελούν κάποιες εξαιρετικές ως μοναδικές ιδιότητες, όπως το γεγονός ότι στη στερεή

κατάσταση έχει μικρότερη πυκνότητα σε σύγκριση με την υγρή αντίστοιχη, η σχετικά υψηλή θερμοκρασία βρασμού (100 °C), σε σύγκριση με τη σχετικά μικρή μοριακή μάζα του (~18*amu*), και η υψηλή του θερμοχωρητικότητα. Το νερό έχει επαμφοτερίζουσα συμπεριφορά, δηλαδή παρουσιάζει ιδιότητες και οξέος και βάσης [62].

Η πυκνότητα του νερού είναι διαφορετική σε διάφορες θερμοκρασίες. Όταν η θερμοκρασία είναι αυξημένη, λόγω των θερμικών ταλαντώσεων αυξάνονται οι μοριακές αποστάσεις με συνέπεια την ελάττωση της πυκνότητας. Στους 4°C περίπου η πυκνότητα του νερού παρουσιάζει μέγιστο. Αυτό οφείλεται στο μεταβολή της διαμόρφωσης της τετραεδρική δομής (σχηματισμός διαφορετικών γωνιών) με αποτέλεσμα περισσότερα μόρια νερού να διατάσσονται στον ίδιο όγκο (συσσωματώματα). Η ανωμαλία αυτή μετά τους 4°C περίπου εξαφανίζεται και έπειτα η συμπεριφορά είναι γραμμική. Αντιθέτως, ο πάγος στους 0°C έχει κρυσταλλική δομή στην οποία έξι μόρια νερού ενώνονται με δεσμούς υδρογόνου και δίνουν εξαγωνικά πλέγματα (βλ. Εικόνα 2.6 δεξιά). Η διάταξη αυτή κρατάει τις δομικές μονάδες σχετικά απομακρυσμένες μεταξύ τους και κατά συνέπεια δημιουργία κενού χώρου μεταξύ τους (αύξηση όγκου)¹⁹ [63].

t(°C)	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
5	0.999961	0.999959	0.999957	0.999955	0.999953	0.999950	0.999948	0.999945	0.999942	0.999939
6	0.999936	0.999933	0.999930	0.999926	0.999922	0.999919	0.999915	0.999911	0.999906	0.999902
7	0.999897	0.999893	0.999888	0.999883	0.999878	0.999872	0.999867	0.999861	0.999856	0.999850
8	0.999844	0.999838	0.999832	0.999825	0.999819	0.999812	0.999805	0.999798	0.999791	0.999784
9	0.999777	0.999769	0.999761	0.999754	0.999746	0.999738	0.999730	0.999721	0.999713	0.999704
10	0.999695	0.999687	0.999678	0.999669	0.999659	0.999650	0.999640	0.999631	0.999621	0.999611
11	0.999601	0.999591	0.999581	0.999570	0.999560	0.999549	0.999538	0.999527	0.999516	0.999505
12	0.999494	0.999482	0.999471	0.999459	0.999447	0.999435	0.999423	0.999411	0.999398	0.999386
13	0.999373	0.999361	0.999348	0.999335	0.999322	0.999309	0.999295	0.999282	0.999268	0.999255
14	0.999241	0.999227	0.999213	0.999199	0.999184	0.999170	0.999156	0.999141	0.999126	0.999111
15	0.999096	0.999081	0.999066	0.999051	0.999035	0.999019	0.999004	0.998988	0.998972	0.998956
16	0.998940	0.998923	0.998907	0.998891	0.998874	0.998857	0.998840	0.998823	0.998806	0.998789
17	0.998772	0.998754	0.998737	0.998719	0.998701	0.998683	0.998665	0.998647	0.998629	0.998611
18	0.998592	0.998574	0.998555	0.998536	0.998517	0.998499	0.998479	0.998460	0.998441	0.998421
19	0.998402	0.998382	0.998363	0.998343	0.998323	0.998303	0.998283	0.998262	0.998242	0.998221
20	0.998201	0.998180	0.998159	0.998138	0.998117	0.998096	0.998075	0.998054	0.998032	0.998011
21	0.997989	0.997967	0.997945	0.997924	0.997901	0.997879	0.997857	0.997835	0.997812	0.997790

Πίνακας 2.3 Τιμές πυκνότητας νερού για διάφορες τιμές θερμοκρασίας βάσει της διατύπωσης των Wagenbreth και Blanke [64]

¹⁹ Ο πάγος δρα μονωτικά για την περαιτέρω απώλεια θερμότητας από τα κάτω στρώματα των υδάτινων μαζών κατά τρόπο ώστε να εμποδίζεται η παγοποίησή τους. Η ιδιαίτερη αυτή ιδιότητα/ανωμαλία της πυκνότητας του νερού, εξαιτίας της οποίας αποτρέπεται η βαθμιαία ψύξη του νερού της επιφάνειας της Γης με ότι αυτό συνεπάγεται, επέτρεψε την εμφάνιση ζωής στον πλανήτη [95].

Η μέτρηση της πυκνότητας του νερού, η κατασκευή συναρτήσεων πυκνότητας – θερμοκρασίας καθώς και τα όργανα μέτρησης, έχουν ερευνηθεί κατά καιρούς με αποτέλεσμα τη δημοσίευση πινάκων αναφοράς πυκνότητας. Οι πίνακες αυτοί αφορούν τιμές πυκνότητας καθαρού νερού ή υδάτινων διαλειμμάτων (νερού με ποσότητα αέρα, νερού-άλατος, κτλ.) συναρτήσει της θερμοκρασίας, οι οποίες έχουν προκύψει βάσει μετρήσεων με τις παραμέτρους μάζας και όγκου απολύτως καθορισμένες με ενδομετρικές και μηχανικές μετρήσεις [60].

3 Δοκιμές και μετρήσεις στους μονωτήρες

Οι δοκιμές πάνω σε ελαστομερή σιλικόνης των μονωτήρων είναι μια συνήθης διαδικασία για την καταγραφή των ιδιοτήτων και την πρόβλεψη συμπεριφοράς και της απόδοσής τους, και ως εκ τούτων την προσαρμογή του σχεδιασμού τους. Οι μεταβολές και οι αλλαγές που εισάγονται κατά τη διαδικασία κατασκευής μπορούν να χαρτογραφηθούν με τη λήψη δοκιμαστικών τεμαχίων από το περίβλημα ενός μονωτήρα. Ωστόσο, είναι γεγονός ότι η εμπειρία μας για τις ιδιότητες των ελαστομερών σιλικόνης δεν είναι ακόμη αρκετά καλή για να γίνουν ακριβείς προβλέψεις απόδοσης για το σύνολο του προϊόντος σε πολλές περιπτώσεις, ακόμη και με τη παραπάνω μέθοδο. Επίσης, στην περίπτωση νέου σχεδιασμού μπορεί να είναι πιο πρόσφορο και αποτελεσματικό, να υποβάλλεται το ίδιο το προϊόν σε διαδικασία δοκιμής εν λειτουργία, παρά να γίνονται δοκιμές προσομοίωσης [58]. Στις περισσότερες περιπτώσεις ωστόσο, αυτό δεν είναι εφικτό για λόγους χρόνου, κόστους ή ασφάλειας. Ως εκ των παραπάνω, όταν πρέπει να αποκλειστούν οι εν λειτουργία δοκιμές και παράλληλα δεν μπορεί να γίνει ακριβής πρόβλεψη από εργαστηριακές δοκιμές υλικού, συχνά είναι απαραίτητο να δοκιμαστεί το προϊόν εν λειτουργία στο πεδίο (σε πραγματικές συνθήκες) για να επιβεβαιωθεί ότι θα αποδώσει ικανοποιητικά. Έως πριν από μερικά χρόνια ήταν δύσκολο και δαπανηρό να γίνουν δοκιμές προσομοίωσης του περιβάλλοντος εγκατάστασης και της διαδικασίας λειτουργίας. Πλέον όμως υπάρχει αρκετή εμπειρία στον τομέα του σχεδιασμού εγκαταστάσεων και προγραμματιστικών εφαρμογών δοκιμών [58].

Η σημασία των μονωτήρων για την αξιόπιστη και αδιάλειπτη λειτουργία του δικτύου είναι μεγάλη, δεδομένου ότι αρκεί η αστοχία ενός και μόνο από αυτούς για να τεθεί το σύστημα εκτός λειτουργίας. Έτσι, κρίνεται επιτακτική η ανάγκη της εκτέλεσης δοκιμών ποιότητας, με τις οποίες θα διασφαλίζεται η αξιοπιστία και η σωστή λειτουργία αυτών των στοιχείων του δικτύου [65]. Η ζήτηση για συνθετικούς μονωτήρες έχει αυξηθεί σημαντικά, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του αριθμού εταιρειών κατασκευής τους. Η κατάσταση αυτή οδηγεί σε περισσότερο εμπορικό ανταγωνισμό. Από την άλλη πλευρά, οι συνθετικοί μονωτήρες εγκαθίστανται στα δίκτυα μέσης και υψηλής τάσης έχοντας δοκιμαστεί ελάχιστα στο πεδίο. Το γεγονός αυτό έδωσε το έναυσμα για πρόσθετες δοκιμές, οι οποίες είναι εύκολες στην

εκτέλεση, συμπληρώνουν τις αναφορές δοκιμών των υφιστάμενων πρότυπων του προϊόντος και παρέχουν περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την αναμενόμενη απόδοση, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με τα αποτελέσματα προϊόντων με γνωστή μακροπρόθεσμη απόδοση υπό τις επιτόπιες συνθήκες δικτύου. [65].

Οι παρακάτω δοκιμές ελέγχου ποιότητας, αποτελούν βασικές δοκιμές από τα αποτελέσματα των οποίων μπορεί κάποιος να αποφανθεί γρήγορα και εύκολα για την κατάσταση ενός συνθετικού μονωτήρα [2] [66]:

- οπτική επιθεώρηση,
- δοκιμή υδροφοβικότητας σύμφωνα με το πρότυπο IEC 62073 [67] (αναλύεται περαιτέρω στην ενότητα Προσδιορισμός της κλάσης της υδροφοβικότητας),
- μέτρηση της σκληρότητας Shore A σύμφωνα με το πρότυπο ISO 48-4 [68],
- μέτρηση της πυκνότητας σύμφωνα με το πρότυπο ISO 2781 [69] (αναλύεται περαιτέρω στην ενότητα Μέτρηση πυκνότητας.),
- δοκιμή σωστής συγκόλλησης του μονωτικού υλικού του περιβλήματος του μονωτήρα στη ράβδο και στους μεταλλικούς ακροδέκτες,
- δοκιμή του κεκλιμένου επιπέδου σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60587 [70] και
- μηχανικές δοκιμές σύμφωνα με τα πρότυπα IEC 61109 [71] (για μονωτήρες ανάρτησης) και IEC 61952 [72] (για μονωτήρες στήριξης).

Οπτική επιθεώρηση

Ο οπτική επιθεώρηση είναι η ευκολότερη δοκιμή, ωστόσο είναι απαραίτητο να γίνει από έμπειρο επιθεωρητή. Κατά την οπτική επιθεώρηση αξιολογείται η κατάσταση του συνθετικού μονωτήρα με βάση την εμφάνισή του, ούτως ώστε να διαπιστωθούν είτε ατέλειες στην κατασκευή των καινούριων μονωτήρων είτε εμφανή σημάδια γήρανσης ή/και βανδαλισμού στους αποξηλωμένους από το δίκτυο μονωτήρες [66]. Με έναν απλό οπτικό έλεγχο της επιφάνειας των κυαθίων σε συνδυασμό με το τσάκισμα τους μπορεί κανείς να συμπεράνει αν ένας μονωτήρας είναι καταπονημένος [65]. Η οπτική εμφάνιση της επιφάνειας του περιβλήματος είναι συχνά ένας δείκτης της ποιότητας της διαδικασίας έγχυσης ή εξώθησης. Επίσης, η πρόσφυση του ελαστομερούς στα υπόλοιπα μέρη είναι καθοριστικός παράγοντας για το πόσο καλά

διατηρείται το περιβλήμα σε επαφή με τη ράβδο και τους ακροδέκτες του μονωτήρα [73].

Έλεγχος σωστής συγκόλλησης

Η δοκιμή σωστής συγκόλλησης του ελαστομερούς περιβλήματος του συνθετικού μονωτήρα στη ράβδο, και στους μεταλλικούς ακροδέκτες έχει νόημα κυρίως στους νέους μονωτήρες για έλεγχο της ποιότητας κατασκευής τους. Αποτελεί μια εύκολη και γρήγορη δοκιμή και απαιτεί απλό εξοπλισμό: ένα κοπίδι και ένα μυτοσίμπιδο.

Η διαδικασία του ελέγχου σωστής συγκόλλησης του περιβλήματος στη ράβδο περιλαμβάνει χάραξη του κατά μήκος του άξονα και περιμετρικά του περιβλήματος του μονωτήρα. Αντίστοιχα για τον έλεγχο συγκόλλησης του περιβλήματος με τους μεταλλικούς ακροδέκτες, γίνεται χάραξη και αποκόλληση του ελαστομερούς περιβλήματος που καλύπτει τους μεταλλικούς ακροδέκτες του μονωτήρα. Αποδεκτό αποτέλεσμα για τη δοκιμή αυτή είναι η μη αποκάλυψη της ράβδου και των μεταλλικών ακροδεκτών κατά την αφαίρεση του περιβλήματος [2].

Μέτρηση της σκληρότητας Shore A

Η μέτρηση της σκληρότητας Shore A που λαμβάνεται συνήθως για ελαστομερή αποτελεί μια μη καταστρεπτική δοκιμή σύμφωνα με το DIN 53505 [74]. Τα υλικά με υψηλότερη περιεκτικότητα σε πρόσθετη πρόσμιξη (Aluminum Trihydrate, Silica κ.τλ.) τείνουν να έχουν αυξημένη σκληρότητα [8] [75].



Εικόνα 3.1 Ηλεκτρονικός μετρητής σκληρότητας ελαστικών της εταιρίας Bareiss [76]

Επίσης, η σκληρότητα δείχνει έμμεσα αν το ελαστομερές σιλικόνης είναι βουλκανισμένο σε υψηλή θερμοκρασία [2]. Συγκεκριμένα υπάρχει ο εμπειρικός

κανόνας ότι η σκληρότητα shore A, σε καινούριους μονωτήρες στους οποίους δεν έχει υπεισέλθει γήρανση, θα πρέπει να είναι μεταξύ των τιμών 65 και 75 για να θεωρείται κατασκευασμένο με τη μέθοδο HTV το ελαστομερές σιλικόνης, όπως απαιτείται και από την προδιαγραφή της ΔΕΗ [77].

Η μέτρηση της σκληρότητας shore A είναι επίσης ένας δείκτης της γήρανσης ενός μονωτήρα. Μετρήσεις έχουν δείξει ότι, μετά από χρόνια λειτουργίας των συνθετικών μονωτήρων στο δίκτυο, η σκληρότητα αυξήθηκε. Η μέτρηση της σκληρότητας εμφανίζει μικρότερες διακυμάνσεις όταν μετράται στο μέσον των κυαθίων των συνθετικών μονωτήρων παρά κοντά στις άκρες τους [2].

Δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου (Inclined Plane Test)

Η δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου εξετάζει (σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60587 [70]) την αντοχή του μονωτικού υλικού του περιβλήματος ενός συνθετικού μονωτήρα έναντι σχηματισμού επιφανειακών αγωγίμων οδούσεων άνθρακα και διάβρωσης (tracking & erosion). Η διαδικασία η οποία ακολουθείται για την περίπτωση των συνθετικών μονωτήρων είναι η παρακάτω: 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 διάλυμα²⁰ 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 χωρίς το ρεύμα διαρροής να ξεπεράσει τα 60mA για 2 δευτερόλεπτα και χωρίς διάτρηση των δειγμάτων [2].

Δοκιμές μηχανικής αντοχής

Η μηχανική αντοχή του μονωτήρα θα πρέπει να ελεγχθεί ώστε να μπορούμε να προβλέψουμε ενδεχόμενη αστοχία του ή να διαπιστώσουμε τυχόν κατασκευαστική του

²⁰ Διάλυμα άλατος NH_4Cl σε συγκέντρωση 0,1% κατ' όγκο και επιφανειοδραστικής ουσίας Triton X-100 σε συγκέντρωση 0,02% κατ' όγκο σε απιονισμένο νερό

ατέλεια. Η δοκιμή αυτή διαφοροποιείται ανάλογα με τον τύπο του μονωτήρα. Για μονωτήρες ανάρτησης πραγματοποιείται η δοκιμή εφελκυσμού σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61109 [71], ώστε να διαπιστωθεί αν ο μονωτήρας μπορεί να αντέξει τα φορτία εφελκυσμού που αναφέρονται στις προδιαγραφές του ενώ για μονωτήρες στήριξης πραγματοποιείται η δοκιμή κάμψης σύμφωνα με το IEC 61952 [72] και ο προσδιορισμός της παραμέτρου MDCL (Maximum Design Cantilever Load) για να διαπιστωθεί, και εδώ, αν τηρούνται τα γραφόμενα στις προδιαγραφές τους [2].

3.1 Προσδιορισμός της κλάσης της υδροφοβικότητας

Σε συνθετικούς μονωτήρες εγκατεστημένους σε περιβάλλον με υψηλά επίπεδα ρύπανσης, η υδροφοβικότητα μπορεί να προσδιοριστεί από δύο τύπους μετρήσεων: με μέτρηση στατικής υδροφοβικότητας και με μέτρηση δυναμικής υδροφοβικότητας. Η *στατική υδροφοβικότητα* χαρακτηρίζει την υδροφοβικότητα της πρώτης ύλης ή με άλλα λόγια την υδροφοβικότητα του υλικού υπό κανονικό και σταθερό εύρος καταπονήσεων. Οι μετρήσεις της *δυναμικής υδροφοβικότητας* περιλαμβάνουν παρακολούθηση των μηχανισμών μεταφοράς, απώλειας και ανάκτησης της υδροφοβικότητας και των παραμέτρων που προκαλούν αυτά τα φαινόμενα [55].

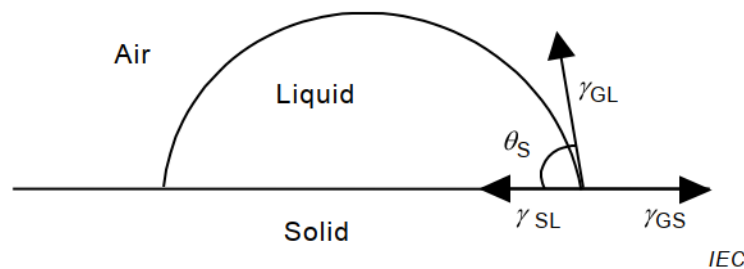
3.1.1 Μέτρηση της υδροφοβικότητας βάσει του IEC/TS 62073

Το πρότυπο IEC/TS 62073 [67] υιοθέτησε εν πολλοίς τις μεθόδους μέτρησης και χαρακτηρισμού της υδροφοβικότητας των συνθετικών μονωτήρων του STRI “Hydrophobicity Classification Guide” [78] του 1992. Στο IEC/TS 62073 [67] περιγράφονται τρεις μέθοδοι ταξινόμησης των συνθετικών μονωτήρων σε κλάσεις υδροφοβικότητας: α) surface tension method, β) contact angle method και γ) spray method (μέθοδος ψεκασμού). 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. Αντίθετα, η μέθοδος ψεκασμού μπορεί να διεξαχθεί για τη μέτρηση της υδροφοβικότητας και σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας των συνθετικών

μονωτήρων (υπό ορισμένες προϋποθέσεις), λόγω της ευκολίας διεξαγωγής της και των απαιτήσεων για απλό εξοπλισμό [2].

3.1.1.1 Μέθοδος μέτρησης της γωνίας επαφής.

Η στατική γωνία επαφής (θ_s) αποτελεί μέτρο διαβρεξιμότητας της επιφάνειας: Ανάλογα με τη γωνία επαφής σταγονιδίων νερού, το υλικό ταξινομείται ως: υδρόφιλο (το υλικό που διαβρέχεται εύκολα επιτρέπει στο νερό να έλθει σε επαφή με μεγάλη επιφάνεια και ως εκ τούτου δημιουργεί γωνία επαφής μικρότερη από 90°), υδρόφοβο (το υδρόφοβο υλικό επιτρέπει λιγότερη επαφή της επιφάνειας του νερού και έτσι σχηματίζει γωνία επαφής $90^\circ < \theta_s < 150^\circ$) ή υπερυδροφοβικό ($\theta_s > 150^\circ$). Γενικά όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία επαφής, τόσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς της αλληλεπίδρασης υγρού-υγρού, καθιστώντας το υλικό πιο υδρόφοβο [67].



Σχήμα 3.1 Στατική γωνία επαφής (θ_s) που δημιουργεί η σταγόνα υγρού όταν έρχεται σε επαφή με στερεή επιφάνεια [67]

Στο παραπάνω Σχήμα 3.1 ισχύει η εξίσωση (3.1) του Young [79]:

$$\gamma_{GL} \cos\theta_s = \gamma_{GS} - \gamma_{SL} \quad (3.1)$$

όπου:

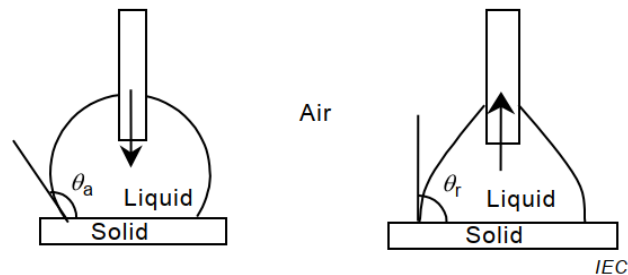
θ_s : η στατική γωνία επαφής του άκρου της σταγόνας με τη στερεή επιφάνεια.

γ_{GL} : η επιφανειακή τάση της διεπαφής αέρα-υγρού

γ_{GS} : η επιφανειακή τάση της διεπαφής αέρα-στερεού

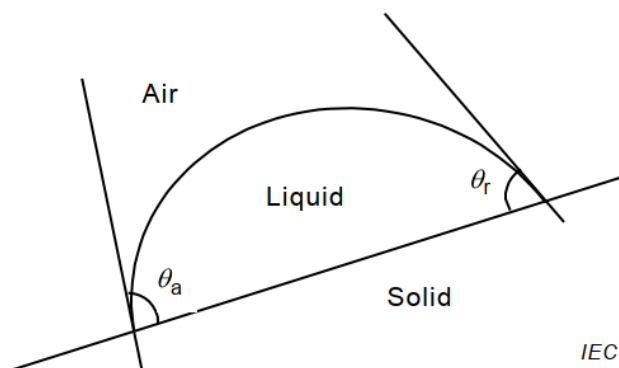
γ_{SL} : η επιφανειακή τάση της διεπαφής στερεού-υγρού

Η γωνία επαφής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τραχύτητα της επιφάνειας, συνεπώς οι γωνίες επαφής που μετρώνται σε ρυπασμένες επιφάνειες μπορεί να διαφέρουν από τις γωνίες επαφής που μετρούνται σε λείες, καθαρές και επίπεδες επιφάνειες.



Σχήμα 3.2 Μετρήσεις της γωνίας υποχώρησης (θ_r) και της γωνίας προώθησης (θ_a) προσθέτοντας ή αφαιρώντας νερό από τη σταγόνα [67]

Η υστέρηση γωνίας επαφής (contact angle hysteresis) αποτελεί ένα ακόμη μέγεθος ορισμού της υδροφοβικής επιφάνειας και της επιφανειακής πρόσφυσης²¹. Η υστέρηση γωνίας επαφής μπορεί να προσδιοριστεί μετρώντας την αύξουσα γωνία (θ_a) και τη φθίνουσα γωνία (θ_r). Η αύξουσα γωνία (θ_a) είναι η γωνία του σταγονιδίου νερού μεταξύ της στερεάς επιφάνειας και της επιφάνειας του κάτω μέρους του σταγονιδίου στην κεκλιμένη επιφάνεια (βλ. Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3 Ορισμός της αύξουσας γωνίας (θ_a) και της φθίνουσας γωνίας (θ_r) σε σταγόνα υγρού επικείμενη σε κεκλιμένη στερεή επιφάνεια [67]

²¹ Η γωνία επαφής σταγονιδίων και η υστέρηση γωνίας επαφής προκαλούνται από την ετερογένεια και την τραχύτητα της επιφάνειας. Η τραχύτητα της επιφάνειας μπορεί να χωριστεί είτε σε μικροσκοπική είτε σε νανοσκοπική τραχύτητα και αμφότερες συμβάλουν στην αύξηση της γωνίας επαφής των σταγονιδίων νερού. Οι διαφορετικές μέθοδοι κατασκευής μπορούν να βελτιώσουν τη μάκρο, μικρο και νάνο-τραχύτητα του υλικού, πράγμα που οδηγεί σε ένα πιο υδρόφοβο υλικό.

Η δε φθίνουσα γωνία (θ_r) ενός σταγονιδίου σε κεκλιμένη επιφάνεια είναι η γωνία μεταξύ της στερεάς επιφάνειας και της επιφάνειας του πίσω μέρους του σταγονιδίου (υψηλότερο τμήμα στην κεκλιμένη επιφάνεια) [67].

Η γενική σχέση μεταξύ της αύξουσας και φθίνουσας γωνίας και της στατικής γωνίας επαφής είναι [67]:

$$\theta_r \leq \theta_s \leq \theta_a \quad (3.2)$$

Εάν $\theta_a > \theta_r$ ή φθίνουσα γωνία επαφής είναι μηδέν – που σημαίνει αδύναμη επιφανειακή πρόσφυση, σχηματίζεται μια υδάτινη διαδρομή καθώς η σταγόνα ρέει κατά μήκος της στερεάς κεκλιμένης επιφάνειας (lotus effect). Αντίθετα αν $\theta_a < \theta_r$ το σταγονίδιο δεν μπορεί να γλιστρήσει στην κεκλιμένη πλατφόρμα (petal effect) [80].

Η μέτρηση της γωνίας γίνεται συνήθως με τη χρήση μεγεθυντικής συσκευής, η οποία διαθέτει βαθμονομημένο γωνιόμετρο, στερεωμένης σε ένα πλαίσιο με μία σύριγγα για εφαρμογή του σταγονιδίου στο υπό εξέταση δοκίμιο. Η μέτρηση μπορεί να επιτευχθεί ακόμα και με μεγέθυνση του σταγονιδίου με χρήση ενός προβολέα πίσω από το σταγονίδιο και προβολή της εικόνας του πάνω σε βαθμονομημένο υπόβαθρο. Για ακριβές αποτέλεσμα μέτρησης υδροφοβικότητας του μονωτήρα πρέπει να διεξαχθούν πολλές μετρήσεις της επαπτομένης γωνίας σε διαφορετικές περιοχές των κυαθίων του.

Η μέθοδος αυτή δίνει τιμή υδροφοβίας με καλή ακρίβεια, για την περιοχή που εξετάζεται, όμως εκτελείται καλύτερα στο εργαστήριο από ό, τι στο πεδίο. Επίσης, η μέτρηση γίνεται εύκολα σε πρακτικά επίπεδες επιφάνειες και εάν η γήρανση έχει επηρεάσει την επιφανειακή μορφολογία του υλικού, δηλαδή υπάρχουν ρηγματώσεις, η μέτρηση μπορεί να επηρεαστεί δυσμενώς [48] [43].

3.1.1.2 Μέθοδος μέτρησης επιφανειακής τάσης.

Ο προσδιορισμός της επιφανειακής τάσης του περιβλήματος ενός μονωτήρα βασίζεται στο γεγονός ότι σταγόνες από διαφορετικά υγρά οργανικά μίγματα έχουν διαφορετική ικανότητα διαβροχής της επιφάνειας του μονωτήρα. Κάθε ίχνος ενεργών προσμίξεων στο υγρό αντιδραστήριο ή στην επιφάνεια μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα. Σε επιφάνειες ρυπασμένων μονωτήρων μπορεί να υπάρξουν περιορισμοί στη χρησιμοποίηση αυτής της μεθόδου, καθώς είναι δυνατό να

αλληλεπιδράσουν οι ρυπαντές και τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση. Θεωρείται ότι το μίγμα υγραίνει την επιφάνεια του μονωτήρα όταν αυτή παραμένει άθικτη, καθώς καλύπτεται συνεχώς από υγρό για τουλάχιστον 2 δευτερόλεπτα. Η συρρίκνωση της περιφέρειας του υγρού καλύμματος δεν σημαίνει έλλειψη ύγρανσης. Μόνο η διάσπαση σε σταγονίδια μέσα σε 2sec σημαίνει έλλειψη ύγρανσης [67].

Η μέθοδος μέτρησης της επιφανειακής τάσης δίνει μια αρκετά ακριβής τιμή της υδροφοβίας της περιοχής που μετράται, είναι αρκετά εύκολη στην εκτέλεση όμως απαιτεί ορισμένες προφυλάξεις ασφαλείας. Επίσης, μπορεί να είναι δύσκολο να εφαρμοστεί εάν η επιφάνεια καλύπτεται με στρώμα ρύπανσης ή μπορεί να επηρεαστεί από την αλληλεπίδραση μεταξύ ορισμένων τύπων επιφανειακής ρύπανσης με τους διαλύτες μέτρησης. Τέλος, απαιτεί πολλές μετρήσεις για πλήρης αξιολόγηση της επιφάνειας του μονωτήρα [67]

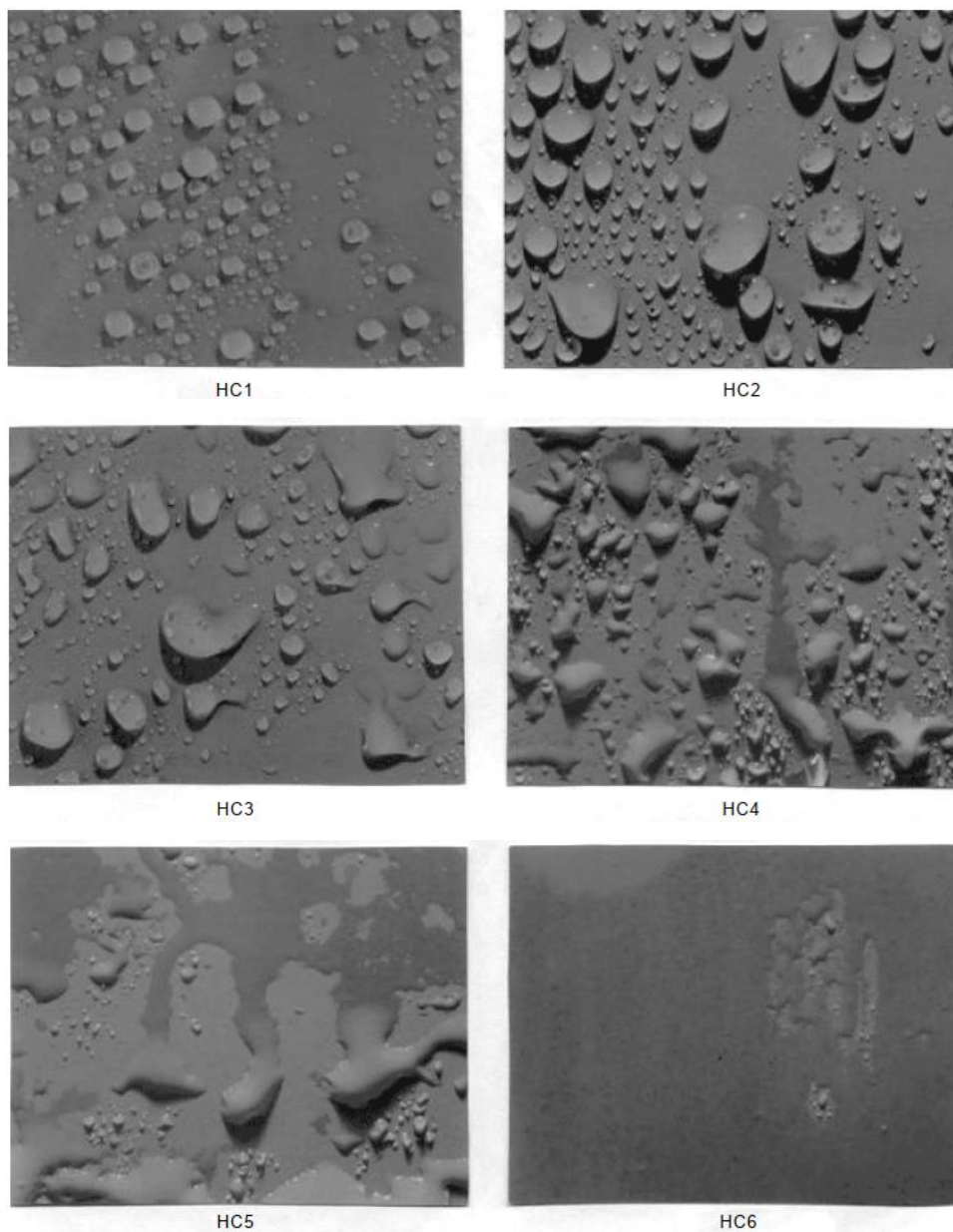
3.1.1.3 Μέθοδος ψεκασμού.

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε από το Σουηδικό Ερευνητικό Ινστιτούτο Διανομής (STRI) και βασίζεται στο ποσοστό διαβροχής που επιτρέπει η επιφάνεια ενός μονωτήρα μετά από έκθεση σε υδατονέφωση για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Ο εξοπλισμός που χρειάζεται είναι μια συσκευή που μπορεί να παράγει ομίχλη, όπως ένα δοχείο ψεκασμού με (απιονισμένο κατά προτίμηση) νερό. Το νερό δεν πρέπει να περιέχει καθόλου σωματίδια που μπορεί να επηρεάσουν την επιφανειακή τάση του, όπως απορρυπαντικά, διαλυτικά κ.α. Η περιοχή ελέγχου πρέπει να είναι περίπου από 50 cm² ως 100 cm². Η αναλογία μεταξύ μήκους και βάθους της εξεταζόμενης περιοχής δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 1:3 [67].

Ο ψεκασμός πραγματοποιείται από μια απόσταση 20±10cm και χρησιμοποιείται ποσότητα νερού μεταξύ 10ml και 30ml και διαρκεί για 20 έως 30 sec. Οι μετρήσεις της υδροφοβικότητας πραγματοποιούνται μέσα σε 10 sec μετά την ολοκλήρωση του ψεκασμού [67].

Σύμφωνα με τη μέθοδο ψεκασμού υπάρχουν επτά κλάσεις υδροφοβικότητας των συνθετικών μονωτήρων. Η κλάση 1 αντιπροσωπεύει τους περισσότερο υδρόφοβους, ενώ η κλάση 7 αναφέρεται στους περισσότερο υδρόφιλους μονωτήρες. Η βασική ιδέα της μεθόδου αυτής είναι ότι, λαμβάνονται φωτογραφίες ψεκασμένων συνθετικών μονωτήρων με νερό και έπειτα αξιολογούνται και ταξινομούνται βάσει των

φωτογραφιών αναφοράς του προτύπου IEC 62073 [67] για τον προσδιορισμό της κατηγορίας υδροφοβικότητας [67].



Εικόνα 3.2 Φωτογραφίες επιφανειών με τις 6 διαφορετικές κλάσεις υδροφοβικότητας [67].

Τα κριτήρια για την ταξινόμηση των διαβρεγμένων επιφανειών είναι οπτικά και λαμβάνουν υπόψη δύο παραμέτρους:

- α) το σχήμα και η γωνίες των σταγόνων που δημιουργούνται και
- β) το επί της εκατό τμήμα της επιφάνειας που έχει διαβραχεί.

Η μέθοδος ψεκασμού είναι σχετικά εύκολη στην εκτέλεση ενώ απαιτεί απλό εξοπλισμό και παρέχει μια γενική εκτίμηση της υδροφοβίας της επιφάνειας του

περιβλήματος. Ωστόσο, το αποτέλεσμα εξαρτάται από την υποκειμενική οπτική εξέταση της επιφάνειας²². Σημειώνεται όμως ότι η αβεβαιότητα/σφάλμα στην οπτική εκτίμηση δεν είναι συνήθως μεγαλύτερη από 1 κλάση υδροφοβικότητας.

HC	Περιγραφή	Φθίνουσα γωνία επαφής (θr)
1	Μόνον διακριτές σταγόνες σχηματίζονται. Το σχήμα τους, όταν παρατηρείται κάθετα στην επιφάνεια είναι πρακτικά σφαιρικό.	>60°
2	Μόνον διακριτές σταγόνες σχηματίζονται. Το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας καλύπτεται από σταγονίδια με σχήμα (όπως φαίνεται κάθετα στην επιφάνεια), ακόμη κανονικό αλλά αποκλίνει από τη σφαιρική μορφή.	40° με 60°
3	Μόνον διακριτές σταγόνες σχηματίζονται. Το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας καλύπτεται από σταγονίδια με ακανόνιστο σχήμα.	10° με 40°
4	Παρατηρούνται τόσο διακριτές σταγόνες όσο και υγρά ίχνη από υδάτινες μονοπάτια (περίπου θr=0°). Λιγότερο από το 10% της παρατηρούμενης περιοχής καλύπτεται από υδάτινες διαδρομές ή στρώμα νερού.	40° με 10°
5	Παρατηρούνται τόσο διακριτά σταγονίδια, όσο και βρεγμένα ίχνη από υδάτινες διαδρομές ή στρώμα νερού (δηλαδή θr = 0° σε κάποια από τα σταγονίδια). Περισσότερο από το 10%, αλλά λιγότερο από το 90% της παρατηρούμενης περιοχής καλύπτεται από υδάτινες διαδρομές ή στρώμα νερού.	0° με 10°
6	Περισσότερο από το 90%, αλλά λιγότερο από το 100% της παρατηρούμενης περιοχής καλύπτεται από υδάτινες διαδρομές ή στρώμα νερού (δηλ. Παρατηρούνται ακόμη μικρές στεγνές περιοχές / κηλίδες / ίχνη).	0° με 50°
7	Ένα συνεχές υδάτινο στρώμα παρατηρείται σ' ολόκληρη την εξεταζόμενη περιοχή.	0°

Πίνακας 3.1. Κριτήρια για τον προσδιορισμό της κλάσης υδροφοβικότητας [67].

²² Η κατηγοριοποίηση είναι δυνατό πλέον να γίνει αυτοματοποιημένα, μέσω της εκπαίδευσης συνελκτικών νευρωνικών δικτύων. Τα δίκτυα αυτά εκπαιδεύονται με φωτογραφίες ψεκασμένων με απιονισμένο νερό συνθετικών μονωτήρων και το ποσοστό ακρίβειας φτάνει έως και 97,68%. Πλεονέκτημα αυτών των δικτύων είναι ότι, μπορούν να φορτωθούν σε κάποια ενσωματωμένη πλατφόρμα και να αξιοποιηθούν για εναέρια επιθεώρηση συνθετικών μονωτήρων μέσω μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος (drone) [2].

Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση είτε καθαρών είτε ρυπασμένων επιφανειών, τα αποτελέσματα όμως είναι δυνατό να επηρεαστούν δυσμενώς από ορισμένους τύπους επιφανειακής ρύπανσης.

3.2 Μέτρηση πυκνότητας.

Τα ελαστομερή σιλικόνης με δυνατότητα χύτευσης όπως το RTV και το LSR έχουν συνήθως πυκνότητα μικρότερη από $1,2 \text{ gr/cm}^3$, ενώ το HTV με πρόσθετη πρόσμιξη ένυδρης αλουμίνης (ATH) έχει πυκνότητα μεγαλύτερη από $1,5 \text{ gr/cm}^3$. Στην περίπτωση υδροφοβικών υλικών, μπορεί να είναι απαραίτητο να προστεθεί διαλύτης διαβροχής στο νερό για να μετρηθεί η πυκνότητα του υλικού. Διαφορετικά, οι φυσαλίδες αέρα μεταξύ της επιφάνειας του υλικού και του νερού ενδέχεται να γίνουν αιτία λανθασμένου αποτελέσματος [8].

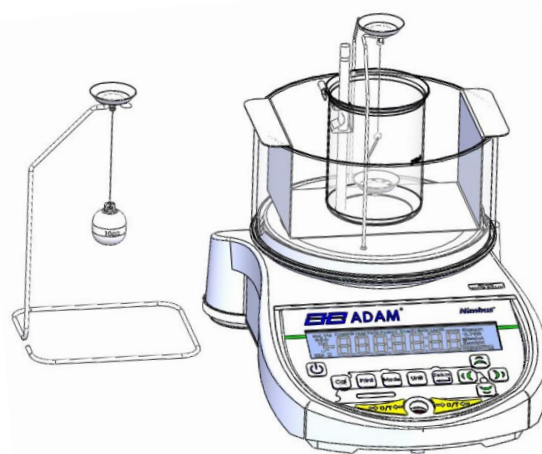
Η Αμερικανική Εταιρία Δοκιμών και Υλικών (American Society for Testing and Materials – ASTM International) [81] δεν έχει συγκεκριμένη μέθοδο μέτρησης πυκνότητας. Αναφέρονται, ωστόσο, σύντομα μέθοδοι μέτρησης της πυκνότητας με πυκνόμετρο, υδροστατική ζύγιση κτλ. στο πρότυπο D297 της ASTM για τη χημική ανάλυση ελαστομερών προϊόντων. Το πρότυπο ISO 2781:2018 προβλέπει δύο βασικές μεθόδους μέτρησης της πυκνότητας. Οι δύο αυτές μέθοδοι περιγράφονται αναλυτικά στις επόμενες ενότητες [69].

Στη μέθοδο A, η μάζα του δοκιμίου και η μάζα του νερού η οποία ισούται με τον όγκο του δοκιμίου, προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας μια ζυγαριά εξοπλισμένη με ειδικό στέλεχος για αυτή τη μέτρηση (βλ. Εικόνα 3.3). Η μέθοδος B αποτελεί μια καταστρεπτική δοκιμή και χρησιμοποιείται μόνο όταν είναι απαραίτητο να τεμαχιστεί το δοκίμιο σε μικρά κομμάτια για να εξαλειφθούν οι χώροι αέρα. 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 [58].

Κατά τη διαδικασία προετοιμασίας των δειγμάτων, θα πρέπει να αφαιρεθούν τυχόν ξένα σώματα από την επιφάνεια τους με κατάλληλο μη τοξικό υγρό χαμηλού σημείου βρασμού. Θα πρέπει όμως να αποφευχθεί αλλοίωση ή τέντωμα του ελαστομερούς κατά τη διάρκεια του καθαρισμού, και το υγρό, εάν χρησιμοποιηθεί, πρέπει να εξατμίζεται άμεσα και πλήρως από τις ελαστικές επιφάνειες [69].

3.2.1 Μέθοδος Α

Στη μέθοδο Α η μέτρηση γίνεται σε δοκίμια οποιουδήποτε σχήματος, βάρους τουλάχιστον 2,5 gr έκαστο, εφόσον οι επιφάνειες τους είναι λείες και δεν υπάρχουν σχισμές για να παγιδευτεί ατμοσφαιρικός αέρας και σκόνη. Πρέπει να γίνονται διπλές δοκιμές για λόγους μείωσης του σφάλματος μέτρησης, πράγμα που σημαίνει δύο δοκίμια από κάθε δείγμα αντί για δύο μετρήσεις στο ίδιο δοκίμιο. Το δοκίμιο ζυγίζεται στον αέρα και στη συνέχεια σε αποσταγμένο ή απιονισμένο²³ νερό σε τυπική θερμοκρασία εργαστηρίου ($23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ή $27^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$), χρησιμοποιώντας μια ζυγαριά ακρίβειας χιλιοστού του γραμμαρίου, αφαιρώντας τις φυσαλίδες αέρα που προσκολλούνται στο δοκίμιο.



Εικόνα 3.3 Ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας με τον εξοπλισμό για μέτρηση πυκνότητας στερεού σώματος της εταιρείας ADAM [82]

²³ Νερό που έχει απαλλαγεί από τα διαλυμένα θετικά και αρνητικά ιόντα, διαφόρων αλάτων, τα οποία έχουν αντικατασταθεί με OH^- και H^+ , αντίστοιχα. Ο απιονισμός γίνεται με τους απιονιστήρες οι οποίοι είναι κυλινδρικά δοχεία γεμάτα με ρητίνες οι οποίες απορροφούν τα μεταλλικά άλατα (άλατα ανθρακικού ασβεστίου, θειικά άλατα μαγνησίου κτλ.). Το απιονισμένο νερό είναι υψηλής καθαρότητας και χρησιμοποιείται ευρέως στα εργαστήρια, δεν είναι όμως απαλλαγμένο από διαλελυμένα αέρια, οργανικές ουσίες και βακτήρια [95].

Ο καλύτερος τρόπος ανάρτησης του δοκιμίου είναι με ένα πολύ λεπτό νήμα, το βάρος του οποίου μπορεί να συμπεριληφθεί στη μηδενική ρύθμιση του ζυγού (αν το χρησιμοποιούμε νήμα έχει μάζα μεγαλύτερη από 0,010 gr). Το νήμα πρέπει να κατασκευάζεται από υλικό που είναι μη διαλυτό και δεν απορροφά ποσότητα νερού [69].

Όταν αυτή η παραπάνω διαδικασία μέτρησης επιτελείται για ελαστομερές με πυκνότητα μικρότερη από 1 Mg/m^3 , θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί βαρίδι (είναι η περισσότερο συνηθισμένη μέθοδος) ώστε να είναι εφικτή η βύθιση του δοκιμίου²⁴ ή εναλλακτικά να χρησιμοποιηθεί υγρό με πυκνότητα γνωστή και διαφορετική από αυτή του νερού, το οποίο όμως να είναι ουδέτερο ως προς την αλληλεπίδρασή του με το ελαστομερές δοκίμιο.

Συνηθίζεται (και αποτελεί καλή πρακτική), η διαβροχή του δοκιμίου με ένα υγρό όπως μεθυλιωμένο αλκοόλ πριν από τη ζύγιση στο νερό. Το νερό πρέπει να αντικαθίσταται σχετικά συχνά λόγω επιμόλυνσης από το αλκοόλ.

Η πυκνότητα εκφράζεται σε Mg/m^3 και προκύπτει από την παρακάτω σχέση (3.3) [69]:

$$\rho = \rho_w \frac{m_1}{m_1 - m_2} \quad (3.3)$$

όπου:

ρ_w : η πυκνότητα του νερού,

m_1 : η μάζα του ελαστομερούς που προκύπτει από ζύγιση στον αέρα και

m_2 : η μάζα του ελαστομερούς μείον τη μάζα ίσου όγκου νερού, που προκύπτει από ζύγιση στο νερό, ευρισκόμενα και τα 2 σε θερμοκρασία περιβάλλοντος εργαστηρίου.

Όταν χρησιμοποιείται βαρίδι για τη βύθιση του δοκιμίου η παραπάνω σχέση (3.3) τροποποιείται ως κάτωθι [69]:

$$\rho = \rho_w \frac{m_1}{m_1 + m_2 - m_3} \quad (3.4)$$

όπου:

²⁴ Το βαρίδι θα πρέπει να έχει πυκνότητα τέτοια, ώστε να βυθιστεί καθ' ολοκληρία στο υγρό και όχι κατά ένα μέρος του. Μπορεί π.χ. να είναι ένα μικρό κομμάτι μολύβδου. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να υπολογιστεί με ακρίβεια η μάζα του βαριδιού με βύθισή του στο νερό.

ρ_w : η πυκνότητα του νερού,

m_1 : η μάζα του ελαστομερούς που προκύπτει από ζύγιση στον αέρα

m_2 : η μάζα του βαριδιού μείον τη μάζα ίσου όγκου νερού, που προκύπτει από ζύγιση στο νερό, ευρισκόμενα και τα 2 σε θερμοκρασία περιβάλλοντος εργαστηρίου.

m_3 : η μάζα του βαριδιού μαζί με τη μάζα του ελαστομερούς μείον τη μάζα ίσου όγκου νερού (με το βαρίδι και το δοκίμιο), που προκύπτει από ζύγιση στο νερό, ευρισκόμενα και τα 2 σε θερμοκρασία περιβάλλοντος εργαστηρίου.

Οι κύριες πηγές σφαλμάτων στην παραπάνω διαδικασία είναι:

- οι φυσαλίδες αέρα που προσκολλούνται στις επιφάνειες του δοκιμίου κατά τη ζύγιση σε νερό,
- η επίδραση της επιφανειακής τάσης στο νήμα και
- τα ρεύματα στο νερό στο οποίο αιωρείται το δοκίμιο. Για να ελαχιστοποιηθούν πρέπει η θερμοκρασία του νερού και του αέρα στο ζυγό να είναι η ίδια.

Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η προσκόλληση των φυσαλίδων αέρα στο δοκίμιο, συνηθίζεται είτε η προσθήκη επιφανειοδραστικού υγρού, όπως π.χ. απορρυπαντικό, σε αποσταγμένο νερό (περίπου 1 part στα 10.000) είτε η βύθιση του δοκιμίου στιγμιαία σε μεθυλική αλκοόλη αναμεμιγμένη με νερό. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να αποφευχθεί η επιμόλυνση του νερού από τα παραπάνω [58].

3.2.2 Μέθοδος Β

Η μέθοδος Β κατά ISO 2781:2018 [69] περιλαμβάνει μια διαδικασία για την περίπτωση που είναι απαραίτητο να κοπεί το δείγμα σε μικρά κομμάτια προς αποφυγή του παγιδευμένου στο υλικό αέρα. Το δοκίμιο αποτελείται από έναν αριθμό λείων, σχεδόν κυβικού σχήματος κομματιών με διαστάσεις 4mm x 4mm x 6mm.

Όπως στην προηγούμενη μέθοδο, έτσι και εδώ χρησιμοποιείται αποσταγμένο ή απιονισμένο νερό σε τυπική θερμοκρασία εργαστηρίου ($23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ή $27^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$), και ζυγαριά ακρίβειας χιλιοστού του γραμμαρίου. Στο πλαίσιο της μεθόδου ζυγίζονται διαδοχικά ο ογκομετρικός σωλήνας (μόνος του), με το νερό, με το δοκίμιο και με το δοκίμιο και το νερό. Πριν τη ζύγιση πρέπει οπωσδήποτε να αφαιρεθούν οι φυσαλίδες αέρα οι οποίες προσκολλούνται στα κομμάτια του δοκιμίου.



Εικόνα 3.4 Τα κομμάτια από το δοκίμιο για τη μέθοδο Β στις κατάλληλες διαστάσεις

Η μέθοδος Β είναι περισσότερο επίπονη διαδικασία από τη μέθοδο Α και συχνά δεν προτιμάται η εφαρμογή της παρά μόνο σε περιπτώσεις που αμφισβητείται η συμπαγεια του σώματος του ελαστομερούς. Η πυκνότητα εκφράζεται σε Mg/m^3 και προκύπτει από την παρακάτω σχέση (3.5) [69]:

$$\rho = \rho_w \frac{m_2 - m_1}{m_4 - m_3 + m_2 - m_1} \quad (3.5)$$

όπου:

ρ_w : η πυκνότητα του νερού,

m_1 : η μάζα του ογκομετρικού σωλήνα

m_2 : η μάζα του ογκομετρικού σωλήνα μαζί με τη μάζα του δοκιμίου

m_3 : η μάζα του ογκομετρικού σωλήνα μαζί με τη μάζα του δοκιμίου και τη μάζα του νερού

m_4 : η μάζα του ογκομετρικού σωλήνα μαζί με τη μάζα του νερού

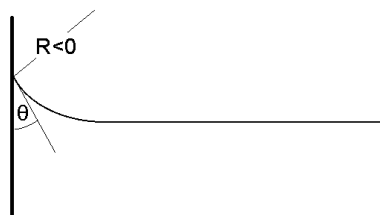
Οι κύριες πηγές σφαλμάτων στη μέθοδο Β είναι:

- οι φυσαλίδες αέρα που προσκολλούνται στις επιφάνειες του δοκιμίου κατά τον εμβαπτισμό σε νερό,
- η επίδραση της επιφανειακής τάσης στη διεπαφή νερού – γυαλιού

3.2.3 Τριχοειδή φαινόμενα

Τα σωματίδια από την επιφάνεια του υγρού, έλκονται μονόπλευρα, γι αυτό το λόγο εμφανίζεται μια συνιστάμενη δύναμη προς το εσωτερικό του υγρού. Συνεπώς τα μόρια που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια, έχουν περισσότερη ενέργεια από τα αντίστοιχα στο εσωτερικό του υγρού. Λόγω της τάσης μείωσης της αποταμιευμένης επιφανειακής ενέργειας, εμφανίζονται δυνάμεις οι οποίες έχουν την τάση να προκαλέσουν συστολή της επιφάνειας, η οποία παίρνει τελικά την μορφή μεμβράνης. Η συνισταμένη αυτών των δυνάμεων (η οποία εκφράζει την ενέργεια που απαιτείται ώστε να αυξηθεί η επιφάνεια του υγρού ανά μονάδα επιφάνειας) ονομάζεται επιφανειακή τάση [83].

Το νερό έχει μεγάλη επιφανειακή τάση εξαιτίας των πολλαπλών δεσμών υδρογόνου μεταξύ των μορίων του. Ένα φαινόμενο που σχετίζεται με την επιφανειακή τάση και μπορεί να επηρεάσει τη μέτρηση και καταγραφή του όγκου με ογκομετρικό σωλήνα, είναι η τριχοειδής ανύψωση (capillarity). Εμπειρικά γνωρίζουμε ότι η ελεύθερη επιφάνεια του νερού πολύ κοντά στα τοιχώματα των γυάλινων δοχείων δεν είναι οριζόντια, αλλά καμπυλώνεται προς τα επάνω. Η τριχοειδής ανύψωση οφείλεται στην ελκτική δύναμη μεταξύ των μορίων του νερού και των μορίων του γυαλιού, SiO_2 , λόγω της δημιουργίας δεσμών υδρογόνου. Η τριχοειδής αυτή ανύψωση σταματάει όταν η επιφανειακή τάση αντισταθμιστεί από το βάρος του υγρού στον σωλήνα [84].



Εικόνα 3.5 Καμπυλότητα της επιφάνειας του υγρού σε σωλήνα

Η καμπυλότητα της επιφάνειας του υγρού σε τριχοειδή σωλήνα προσδιορίζεται από την γωνία θ που ορίζεται από το τοίχωμα που διαβρέχεται και την εφαπτομένη στην επιφάνεια του υγρού στο σημείο επαφής με το τοίχωμα. Η γωνία θ είναι σαφώς καθορισμένη για δεδομένο ζεύγος υγρού και στερεού (π.χ. για το σύστημα νερό-γυαλί είναι 25°) [84].

4 Εργαστηριακές Δοκιμές

4.1 Οι μονωτήρες

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

Το δίκτυο Ελληνικό δίκτυο μέσης τάσης είναι τριφασικό, τριών αγωγών με γειωμένο ουδέτερο κόμβο στους μετασχηματιστές ισχύος υποβιβασμού τάσης 150kV/20kV μέσω αντιστάσεως 12Ω, η οποία περιορίζει το μέγιστο ρεύμα σφάλματος προς γη στο 1kA. Έχει ονομαστική συχνότητα 50Hz και τα χαρακτηριστικά του συνοψίζονται παρακάτω [77]:

Ονομαστική τάση (kV)	Μέγιστη τάση λειτουργίας (kV)	Στάθμη συμμετρικού τριφασικού σφάλματος (kA)
20	24	7,2
15	17,5	10

Εικόνα 4.1 Χαρακτηριστικά του Ελληνικού δικτύου διανομής Μέσης Τάσης [77]



Εικόνα 4.2 Οι μονωτήρες στους οποίους θα γίνουν οι μετρήσεις

Οι μονωτήρες αποξηλώθηκαν κατά τη διάρκεια εργασιών αναβάθμισης και συντήρησης του δικτύου και όχι λόγω σφάλματος ή αστοχίας κατά τη λειτουργία τους. Ήταν εκτεθειμένοι καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας τους σε εναπόθεση σωματιδίων σκόνης μεταφερόμενα από τον άνεμο, ψεκασμό από υδατονέφωση άλατος από θαλάσσιους ανέμους, θερμοκρασίες έως και 38°C καθώς και σε έντονη υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία. Πρόκειται για τρεις μονωτήρες ανάρτησης και πέντε μονωτήρες στήριξης ονομαστικής τάσης λειτουργίας 24kV. Αξίζει να αναφερθεί ότι ο σχεδιασμός των μονωτήρων επιτρέπει την εγκατάστασή τους σε περιοχές με «πολύ βαριά» ρύπανση. Το παραπάνω προκύπτει από τη σύγκριση του μοναδιαίου μήκους ερπυσμού τους με το ελάχιστο βασικό ειδικό μήκος ερπυσμού των μονωτήρων για κάθε τύπο ρύπανσης, όπως ορίζεται από το πρότυπο IEC 60815-3 [53] (βλ. Σχήμα 2.2).

4.1.1 Προδιαγραφές

Οι συνθετικοί μονωτήρες, βάσει των τεχνικών προδιαγραφών κατασκευής που έχει θέσει η ΔΕΗ [77], 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.
 - Για τους μεν μονωτήρες ανάρτησης τα μεταλλικά εξαρτήματα 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 [77].

Χαρακτηριστικά		Μονωτήρες Στήριξης	Μονωτήρες Ανάρτησης
Μήκος ερπυσμού, ελάχιστο	mm	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	mm	-	440
Μέγιστη αντοχή σε κάμψη (SCL)	kN	11	-
Μέγιστο καμπτικό φορτίο σχεδιασμού (MDCL)	kN	4	-
Ακτίνα κορυφαίας αύλακος	mm	19 ± 3	-
Ακτίνα πλευρικής αύλακος	mm	14 ± 2	-
Ελάχιστη περιεκτικότητα του ελαστομερούς σιλικόνης σε πολυ-διμεθυλ-σιλοξάνη (PDMS)	%	37	37

Πίνακας 4.1. Τεχνικές προδιαγραφές (ΔΕΗ) συνθετικών μονωτήρων δικτύου διανομής ΗΕ [77]

Σχετικά με την προσθήκη πρόσθετων ενισχυτικών προσμίξεων (fillers) κατά την δημιουργία του μίγματος, η τεχνική περιγραφή της ΔΕΗ δεν αναφέρεται ούτε στην περιεκτικότητα αλλά ούτε και στο είδος των ανόργανων προσμίξεων τις οποίες το ελαστομερές θα πρέπει να περιέχει.

Οι μονωτήρες είναι κατασκευασμένοι για λειτουργία στο ύπαιθρο, σε άμεση έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία, στη βροχή, στο χιόνι και στον άνεμο. Πιο αναλυτικά δύνανται να λειτουργούν υπό τις κάτωθι συνθήκες περιβάλλοντος:

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 ²

Εικόνα 4.3 Περιβαλλοντικές συνθήκες υπό τις οποίες οι μονωτήρες λειτουργούν βάσει τεχνικής προδιαγραφής ΔΕΗ [77]

4.1.2 Γεωγραφικά χαρακτηριστικά

Οι μονωτήρες 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.

ANNUAL CLIMATOLOGICAL SUMMARY												
NAME: Palaiokounde ELEV: 392 m LAT: 38deg 06min LONG: 23deg 24min												
TEMPERATURE (°C)												
YR	MO	MEAN MAX	MEAN MIN	MEAN	HI	DATE	LOW	DATE	MAX >=32	MAX <=0	MIN <=0	MIN <=-18
20	07	32.2	20.2	26.2	36.9	31	15.9	19	10	00	00	00
20	08	32.2	19.6	25.7	37.6	01	16.3	30	19	00	00	00
20	09	28.5	18.4	23.1	37.0	01	12.6	30	04	00	00	00
20	10	23.7	12.5	17.7	32.2	06	9.2	27	01	00	00	00
20	11	15.8	8.5	11.8	20.1	02	1.9	28	00	00	00	00
20	12	14.0	6.8	10.4	16.8	26	3.3	23	00	00	00	00
		24.4	14.3	19.1	37.6		1.9		034	000	000	000

Εικόνα 4.4 Οι θερμοκρασίες ανά μήνα από τον μετεωρολογικό σταθμό στην περιοχή Παλαιοκούνδουρα Μάνδρας

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) [85].

WIND SPEED (km/hr)						PRECIPITATION (mm)							
YR	MO	AVG.	HI	DATE	DOM DIR	YR	MO	TOTAL	MAX OBS DAY	DATE	DAYS OF RAIN OVER		
											.2	2	20
20	07	4.4	43.5	24	WNW								
20	08	3.8	49.9	01	WNW	20	08	72.0	50.2	08	03	03	01
20	09	6.6	48.3	10	W	20	09	13.6	6.2	18	04	02	00
20	10	3.7	51.5	21	WNW	20	10	21.2	14.6	28	02	02	00
20	11	5.6	51.5	26	WNW	20	11	47.0	24.2	29	06	03	01
20	12	2.8	64.4	14	W	20	12	167.0	32.4	27	09	08	04
		4.5	64.4		SE			320.8	50.2		024	018	006

Εικόνα 4.5 Μέση ταχύτητα ανέμου και βροχόπτωση ανά μήνα από τον μετεωρολογικό σταθμό στην περιοχή Παλαιοκούνδουρα Μάνδρας [85]

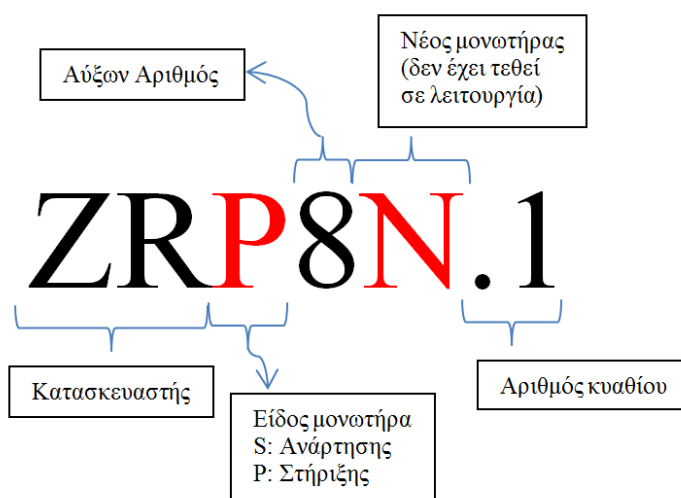
Τέλος, παρατηρούνται μικρής έντασης βροχοπτώσεις καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, με περισσότερο εκτεταμένη εμφάνιση του φαινομένου (περισσότερα χιλιοστά βρόχινου ύδατος) κατά τους χειμερινούς μήνες.

Αναφορικά με τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ευρύτερη περιοχή της Μάνδρας, όπου ήταν εγκατεστημένοι οι μονωτήρες, πρόκειται για περιοχή με βιοτεχνίες που δεν παράγουν ιδιαίτερα επιβαρυντικούς αέριους ρύπους και με μεσαία πυκνότητα κατοικιών που διαθέτουν καυστήρα. Η κύρια πηγή ρύπανσης είναι αιωρούμενα σωματίδια από σκόνη και εκπομπές καυσαερίων από εστίες οικιακής θέρμανσης και οχήματα. Το γεγονός όμως ότι στην περιοχή πνέουν συχνά άνεμοι (οι οποίοι καθαρίζουν την ατμόσφαιρα) συνυπολογίζοντας ότι επηρεάζεται σε μικρό ποσοστό από θαλάσσιους ανέμους αφού δεν είναι κοντά στην ακτή την κατατάσσουν στις περιοχές με μεσαία ρύπανση.

4.1.3 Κωδικοποίηση

Για τις ανάγκες της εργασίας και για λόγους κατηγοριοποίησης, προηγήθηκε κωδικοποίηση και ονοματοθεσία κάθε μονωτήρα βάσει του κατασκευαστή, του είδους (στήριξης ή ανάρτησης) και του αύξοντος αριθμού του (βλ. Εικόνα 4.6).

Τα δύο πρώτα γράμματα της κωδικής ονομασίας προέρχονται από το όνομα (ή το σήμα κατατεθέν) 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).



Εικόνα 4.6 Ανάλυση κωδικής ονομασίας των μονωτήρων

Ακολουθεί ο αύξον αριθμός ο οποίος δόθηκε βάσει του έτους κατασκευής του μονωτήρα και τέλος, το γράμμα N 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.

Συνοψίζοντας, οι μονωτήρες που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Κωδική Ονομασία	Έτος Κατασκευής	Έτος Αποξήλωσης	Αριθμός Κυαθίων	Μήκος Ερπυσμού (mm)	Μον. Ειδικό Μήκος Ερπυσμού (mm/kV)
ZBS1	2010	2018	9	910	78,81
ZBS2	2010	2019	9	910	78,81
ETP3	2012	2019	7	720	62,35
GNP4	2014	2019	7	730	63,22
GNP5	2017	2020	7	730	63,22
ZRP6	2018	2020	7	730	63,22
ZRS7N	2018	-	9	910	78,81
ZRP8N	2018	-	7	730	63,22

Πίνακας 4.2 Τα στοιχεία των συνθετικών μονωτήρων που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία

4.2 Οπτική επιθεώρηση & δοκιμή υδροφοβικότητας

Στους οκτώ μονωτήρες έγινε αρχικά οπτική επιθεώρηση για να διαπιστωθεί και να καταγραφεί η μορφολογική κατάστασή τους (ρηγματώσεις, ίχνη από δενδρίτες, χτυπήματα, χρωματισμός κυαθίων, κατανομή και είδος ρύπων, κτλ). Όπου κρίθηκε απαραίτητο έγινε και έλεγχος σωστής συγκόλλησης του περιβλήματος στον πυρήνα και στους ακροδέκτες. Στη συνέχεια έλαβαν χώρα οι μετρήσεις υδροφοβικότητας σύμφωνα με μέθοδο C του προτύπου IEC 62073 [67] στο χώρο ηλεκτρικών δοκιμών του εργαστηρίου υψηλών τάσεων και ηλεκτρικών μετρήσεων του ΕΜΠ. Η δοκιμή

εφαρμόστηκε σε όλη την επιφάνεια του ελαστομερούς περιβλήματος κάθε μονωτήρα πριν την αφαίρεση της επιφανειακής ρύπανσής του. Χρησιμοποιήθηκε απιονισμένο νερό σε θερμοκρασία δωματίου και δοχείο ψεκασμού (βλ. Εικόνα 4.7). Κάθε μονωτήρας τοποθετήθηκε στην ειδική βάση στήριξης όπου και δέχτηκε ψεκασμό ύδατος για 20 δευτερόλεπτα από απόσταση περίπου 25 με 30cm.

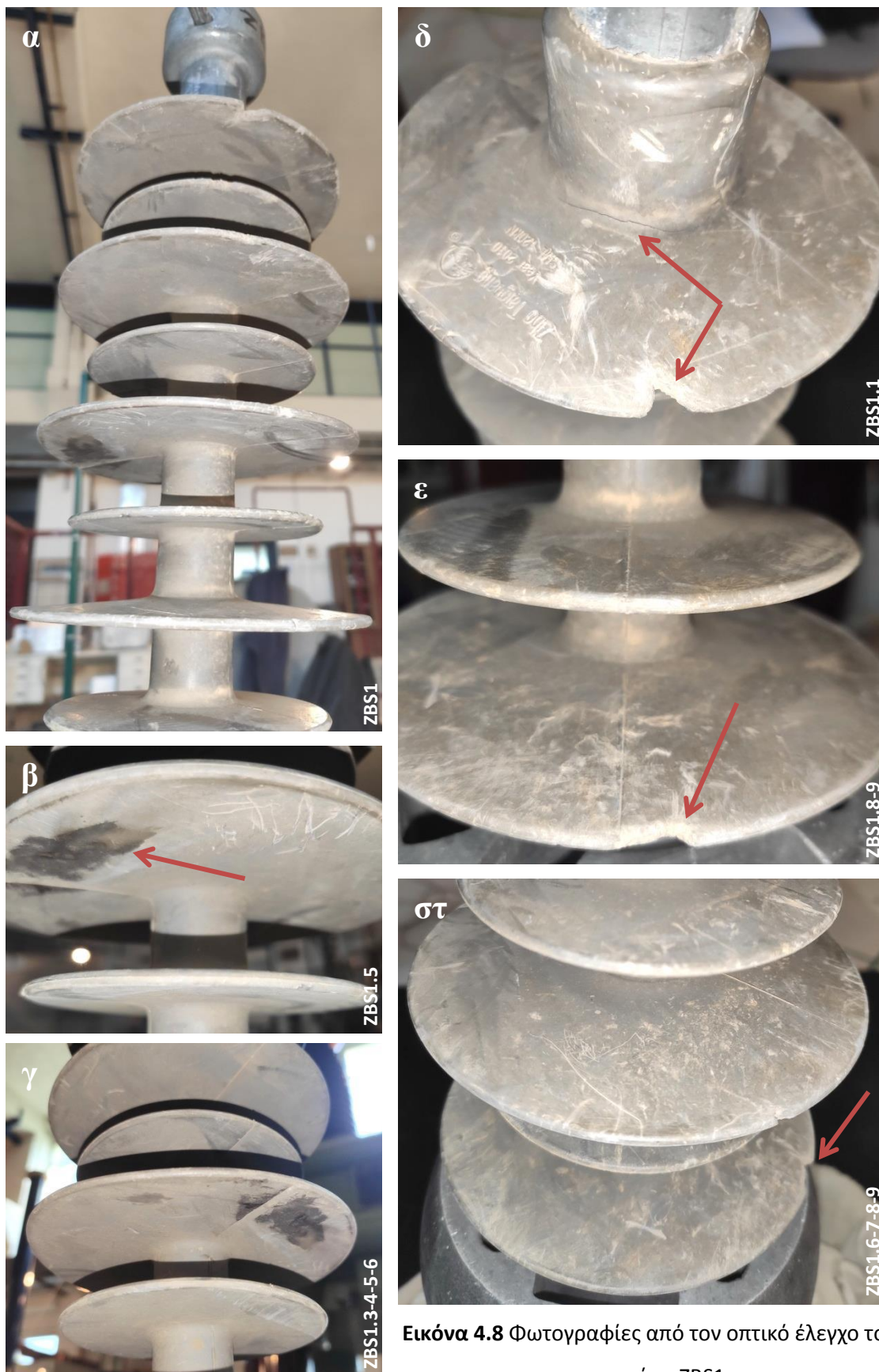
Η ποσότητα νερού που ψεκάστηκε στο χρόνο αυτό κρίθηκε επαρκής ώστε το νερό να στάζει από τα κυάθια. Η λήψη του φωτογραφικού υλικού και η κατάταξη της υδροφοβίας πραγματοποιήθηκαν εντός 10 δευτερολέπτων μετά την ολοκλήρωση του ψεκασμού με βάση τις 7 κλάσεις υδροφοβικότητας που εμφανίζουν οι εικόνες του εν λόγω προτύπου (βλ. Εικόνα 3.2) και τον αντίστοιχο Πίνακα 3.1. Τέλος, για να έχουμε σαφή εικόνα της διακύμανσης της υδροφοβίας κατά μήκος και γύρω από το μονωτήρα οι μετρήσεις υδροφοβικότητας έγιναν ανά κυάθιο.



Εικόνα 4.7 Δοχείο ψεκασμού απιονισμένου νερού

4.2.1 Μονωτήρας ανάρτησης της εταιρείας ZB με αύξοντα αριθμό 1

Ο μονωτήρας ZBS1 είναι τύπου ανάρτησης (ball & socket) με περίβλημα ελαστομερούς σιλικόνης, έχει μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (SML) 120kN και ήταν σε λειτουργία στο δίκτυο μέσης τάσης για 8 χρόνια. Το περίβλημα του μονωτήρα φαίνεται αρκετά καταπονημένο, ενώ εντοπίζονται μορφολογικές αλλοιώσεις και ρηγματώσεις στα σημεία ένωσης των κυαθίων με τον κορμό του μονωτήρα. Πιο συγκεκριμένα σε περιοχή του κυαθίου ZBS1.1 φαίνεται αποχρωματισμός της επιφάνειάς ενώ είναι εμφανείς η ρωγμή, η οποία έχει δημιουργηθεί από τη γήρανση του υλικού και η εγκοπή (πιθανόν από ράμφος πτηνού) στο σώμα του περιβλήματος (βλ. Εικόνα 4.8 δ). Δεν εντοπίζονται καθόλου ίχνη αγωγίμων οδεύσεων άνθρακα. Στο μονωτήρα παρατηρούνται επίσης πολλαπλές εκδορές αλλά και επικαθίσεις ρύπων στέρεας και υγρής μορφής (πιθανόν λάδι μηχανής στην κάτω πλευρά του κυαθίου ZBS1.5 Εικόνα 4.8 β και γ). Οι υγροί ρύποι στις κάτω επιφάνειες του περιβλήματος πιθανόν να δημιουργήθηκαν μετά την αποξήλωση, στο χώρο αποθήκευσης του μονωτήρα.



Εικόνα 4.8 Φωτογραφίες από τον οπτικό έλεγχο του μονωτήρα ZBS1

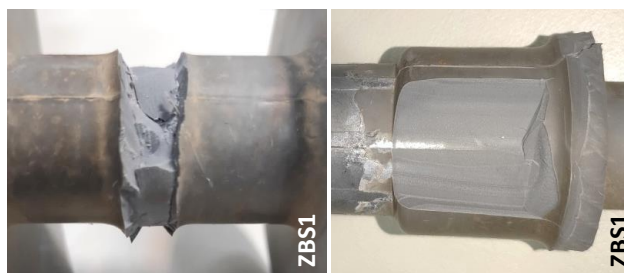


Εικόνα 4.9 Τσάκιση των κυαθίων του ZBS1

Κατά την τσάκιση των κυαθίων δεν παρατηρήθηκαν ρυτίδες ή σχισμή όμως σε όλα τα κυάθια χρειάστηκε αρκετή δύναμη ώστε να λυγίσουν.

Δόκιμη σωστής συγκόλλησης

Στον ZBS1 έγινε και δοκιμή σωστής συγκόλλησης του μονωτικού περιβλήματος του συνθετικού μονωτήρα (SiR) επάνω στη ράβδο και στους ακροδέκτες. Έγινε περιμετρική τομή και προσεκτική αφαίρεση του μονωτικού. Από τη δοκιμή προέκυψε ότι το συνθετικό περίβλημα σιλικόνης είναι σωστά συγκολλημένο επάνω στη ράβδο αλλά και στους ακροδέκτες.



Εικόνα 4.10 Δοκιμή σωστής συγκόλλησης του περιβλήματος στον

4.2.1.1 Δοκιμές υδροφοβικότητας

Στις επιμέρους φωτογραφίες της Εικόνα 4.11 φαίνονται τα κυάθια του μονωτήρα περίπου 10 δευτερόλεπτα μετά τον ψεκάσμο με απιονισμένο νερό. Το κυάθιο ZBS1.1 το οποίο εικονίζεται στις φωτογρ. α, β και δ ανήκει στην κλάση



Εικόνα 4.11 Μετρήσεις υδροφοβικότητας του μονωτήρα ZBS1

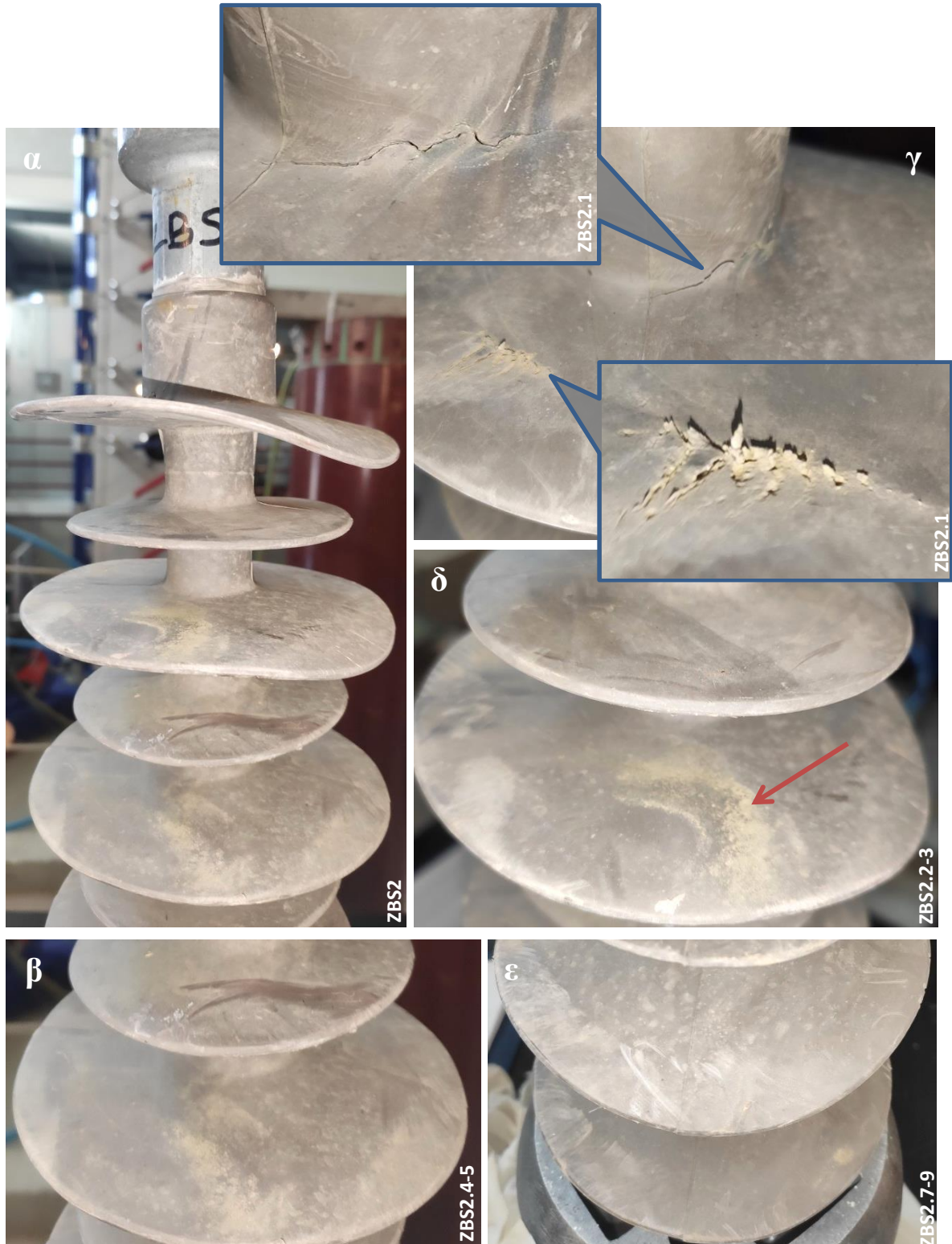
υδροφοβικότητας 3 αφού σχηματίζονται ευδιάκριτες σταγόνες, μεγάλο μέρος της επιφάνειας του καλύπτεται από σταγονίδια με ακανόνιστο σχήμα, ενώ στο αποχρωματισμένο τμήμα έχει σχεδόν χαθεί η υδροφοβικότητα. Το ίδιο ισχύει για το κυάθιο ZBS1.2. Τα κυάθια ZBS1.4, ZBS1.5 (φωτογρ. ε), ZBS1.6, ZBS1.7 (φωτογρ. στ) και ZBS1.9 (φωτογρ. γ) κατατάσσονται στην κλάση 4 αφού παρατηρούνται διακριτές σταγόνες νερού αλλά και σημεία επικάλυψης με υδάτινο στρώμα ($\leq 10\%$ της συνολικής επιφάνειας του κυαθίου) και υδάτινα μονοπάτια. Στην περιφέρεια του ZBS1.9 υπάρχουν μικρές επιφάνειες με στρώματα νερού, όμως αυτό μπορεί να αποδοθεί κατά ένα μέρος στο σχήμα του κυαθίου το οποίο δεν διευκολύνει την αποστράγγιση του νερού. Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζεται η κλάση υδροφοβικότητας ανά κυάθιο του μονωτήρα.

	Κυάθιο	Κλάση Υδροφοβικότητας (HC)
ZBS1	.1	3
	.2	3
	.4	4
	.9	4

Πίνακας 4.3 Κατάταξη υδροφοβικότητας των υπό μελέτη κυαθίων του μονωτήρα ZBS1 βάσει του προτύπου IEC 62073 [67]

4.2.2 Μονωτήρας ανάρτησης της εταιρείας ZB με αύξοντα αριθμό 2

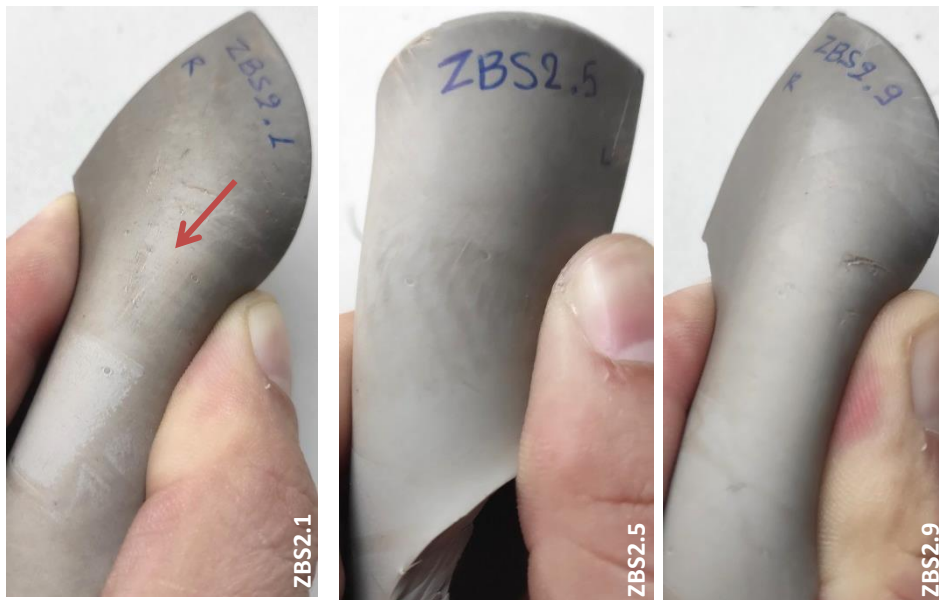
Ο μονωτήρας ZBS2 είναι τύπου ανάρτησης (ball & socket), έχει μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (SML) 120kN και ήταν εγκατεστημένος στο δίκτυο μέσης τάσης του ΔΕΔΔΗΕ για 9 χρόνια, από το 2010 έως το 2019. Το περίβλημα του μονωτήρα και η επιφάνεια των κυαθίων δείχνει να είναι σε καλύτερη κατάσταση μορφολογικά από τον ZBS1. Δεν εντοπίζονται καθόλου ίχνη αγωγίμων οδεύσεων άνθρακα ή δεντρίτες. Παρόλα αυτά, διακρίνεται ρηγμάτωση του ελαστομερούς σε σημείο ένωσης του κυαθίου ZBS2.1 με τον κορμό του μονωτήρα (Εικόνα 4.12 γ - λεπτομέρεια). Το συγκεκριμένο κυάθιο δείχνει να είναι το περισσότερο καταπονημένο στον συγκεκριμένο μονωτήρα αφού στην επιφάνειά του υπάρχει βαθειά εκδορά. Τα παραπάνω οφείλονται σε γήρανση του υλικού σε συνδυασμό με πιθανό χτύπημα. Επίσης, υπάρχουν ρύποι σε όλη την επιφάνεια του ελαστομερούς περιβλήματος



Εικόνα 4.12 Φωτογραφίες από τον οπτικό έλεγχο του συνθετικού μονωτήρα ZBS2

και ειδικά στις επάνω πλευρές των κωθίων ZBS2.3 και ZBS2.5 (Εικόνα 4.12 δ και β αντίστοιχα). Το γεγονός αυτό και οι αυλακώσεις των ρύπων καθιστούν προφανές το

γεγονός ότι οι ρύποι αυτοί έχουν προσκολληθεί στην επιφάνειά του μονωτήρα λόγω διαβροχής (υγρασία, βροχή, ομίχλη, κτλ). Στο μονωτήρα παρατηρείται επίσης έγχρωμο σημάδι ρύπου (ZBS2.5 Εικόνα 4.8 β) πιθανόν να δημιουργήθηκε στον μονωτήρα μετά την αποξήλωσή του.



Εικόνα 4.13 Τσάκιση των κυαθίων του μονωτήρα ZBS2

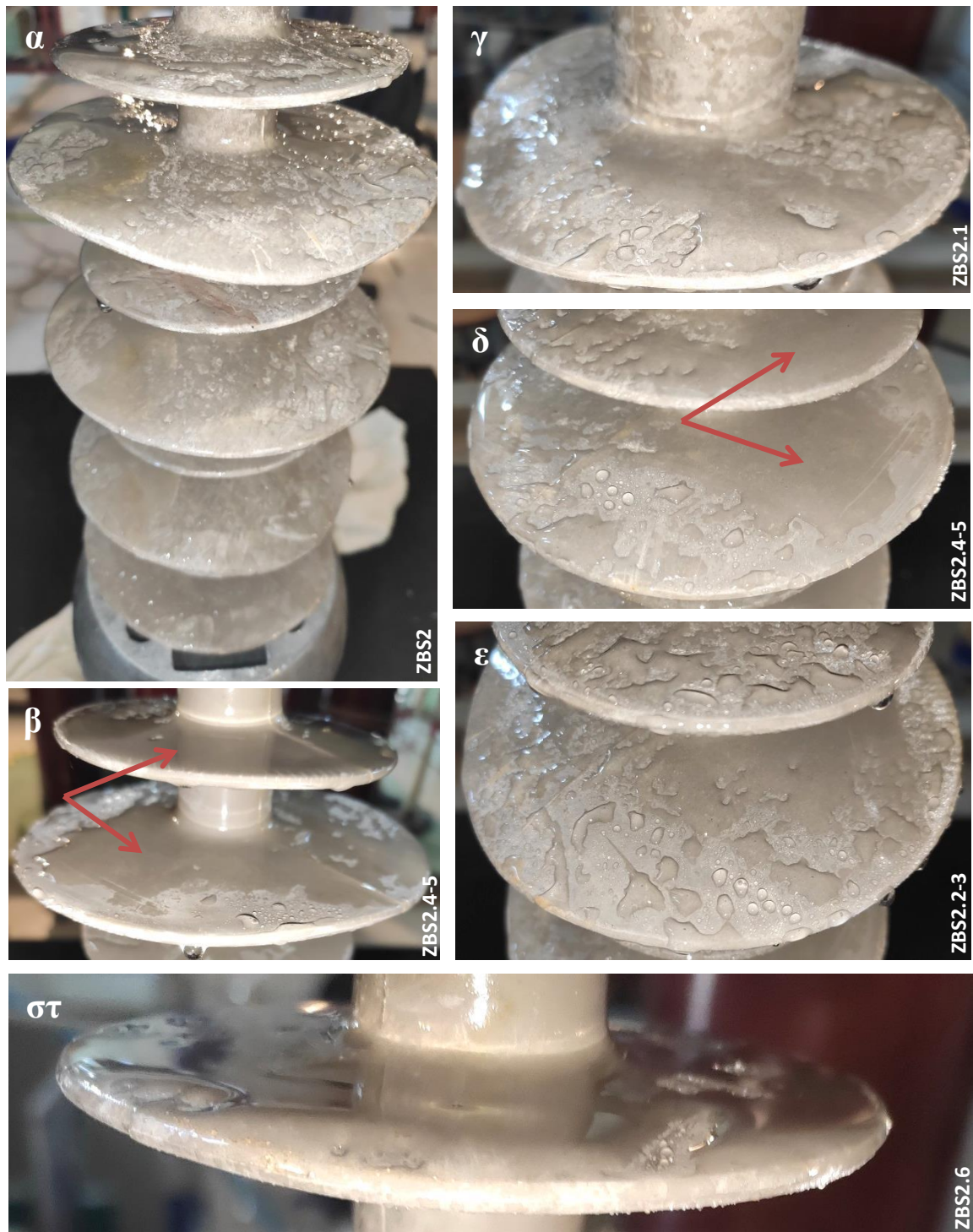
Κατά την τσάκιση των κυαθίων παρατηρήθηκαν πολύ μικρές ρηγματώσεις στο κύαθιο ZBS2.1 - σε αντίθεση με τα υπόλοιπα κύαθια ZBS2.5 ZBS2.9 και ZBS2.3 τα οποία εξετάστηκαν – οι οποίες αποτελούν σημεία γήρανσης του υλικού.



Εικόνα 4.14 Δοκιμή σωστής συγκόλλησης περιβλήματος στον μονωτήρα

Στον ZBS2 έγινε και δοκιμή σωστής συγκόλλησης του μονωτικού περιβλήματος του συνθετικού μονωτήρα (SiR) επάνω στη ράβδο (Εικόνα 4.14) με περιμετρική τομή και προσεκτική αφαίρεση του μονωτικού. Από τη δοκιμή προέκυψε ότι το συνθετικό περίβλημα σιλικόνης είναι σωστά συγκολλημένο επάνω στη ράβδο του μονωτήρα.

4.2.2.1 Δοκιμές υδροφοβικότητας



Εικόνα 4.15 Δοκιμή υδροφοβικότητας του μονωτήρα ZBS2

Στις φωτογραφίες της Εικόνα 4.15 φαίνονται τα κύαθια του μονωτήρα περίπου 10 δευτερόλεπτα μετά τη διαβροχή με ψεκάσμο με απιονισμένο νερό. Η γενικότερη

εικόνα του περιβλήματος του μονωτήρα δείχνει ότι οι υδροφοβικές ιδιότητές του έχουν μειωθεί αισθητά ή δεν έχουν επανέλθει μέσω του μηχανισμού ανάκαμψης της υδροφοβικότητας. Πιο αναλυτικά, το κυάθιο ZBS2.1 το οποίο εικονίζεται στη φωτογρ. γ της Εικόνα 4.15 ανήκει στην κλάση υδροφοβικότητας 5 αφού παρατηρούνται τόσο διακριτά σταγονίδια όσο και βρεγμένα ίχνη από τις υδάτινες διαδρομές ή στρώμα νερού (δηλαδή $\theta_r = 0^\circ$ σε κάποια από τα σταγονίδια). Επίσης, περισσότερο από 10%, αλλά λιγότερο από το 90% των παρατηρούμενων περιοχών καλύπτεται από υδάτινες διαδρομές ή στρώμα νερού. Το ίδιο ισχύει για τα ZBS2.5 (φωτογρ. δ και β, κάτω), ZBS2.6, (φωτογρ. στ) και ZBS2.9. Στην κλάση 4 κατατάσσεται το κυάθιο ZBS2.2. Υπάρχουν δε μεγάλα τμήματα των κυαθίων όπου θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως HC6. Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζεται η κλάση υδροφοβικότητας ανά κυάθιο του μονωτήρα.

	Κυάθιο	Κλάση Υδροφοβικότητας (HC)
ZBS2	.1	5
	.2	4
	.3	5
	.5	5
	.9	5

Πίνακας 4.4 Κατάταξη υδροφοβικότητας των υπό μελέτη κυαθίων του μονωτήρα ZBS2 βάσει του προτύπου IEC 62073 [67]

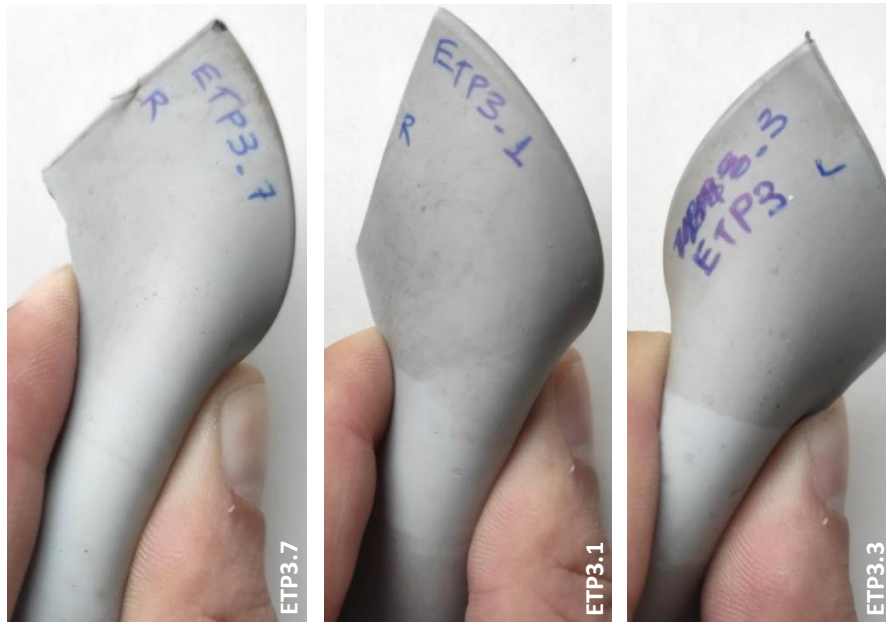
4.2.3 Μονωτήρας στήριξης της εταιρείας ET με αύξοντα αριθμό 3

Ο συνθετικός μονωτήρας ETP3 είναι τύπου στήριξης, έχει 7 κυάθια από HTV SiR και ήταν εγκατεστημένος στο δίκτυο μέσης τάσης του ΔΕΔΔΗΕ για 6 χρόνια, από το 2013 έως το 2019. Το περίβλημα του μονωτήρα και η επιφάνεια των κυαθίων εν γένει, φαίνεται σε καλή κατάσταση μορφολογικά: δεν παρατηρούνται ίχνη αγωγίμων οδεύσεων άνθρακα, χτυπήματα ή έντονες εκδορές εκτός από στρώμα επιφανειακής ρύπανσης στέρεων ρύπων και κηλίδων (βαρέως τύπου υγροί ρύποι, πιθανόν από γράσο ή λάδι μηχανής) στο άκρο του κυαθίου ETP3.3 (βλ. Εικόνα 4.16 δ και στ) οι οποίοι



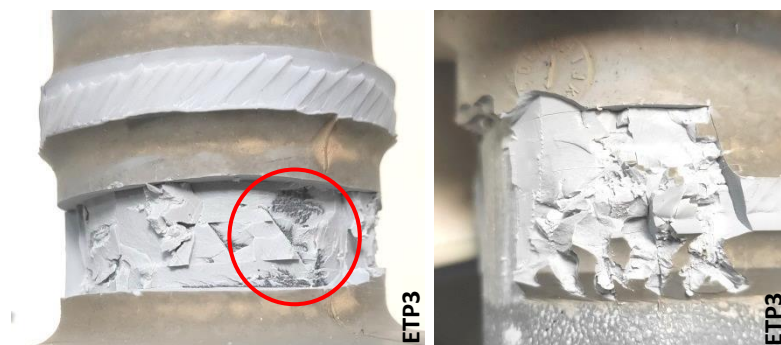
Εικόνα 4.16 Φωτογραφίες από τον οπτικό έλεγχο του μονωτήρα ETP3

πιθανόν να δημιουργήθηκαν κατά την αποξήλωση του μονωτήρα από το δίκτυο. Επίσης, στο περίβλημα δεν υπάρχουν εγκοπές ή εκδορές από πτηνά. Τέλος, οι μεταλλικοί ακροδέκτες είναι σε καλή κατάσταση ενώ δεν υπάρχουν ενδείξεις μη ενδεδειγμένης κόλλησης του ελαστομερούς στο σώμα τους.



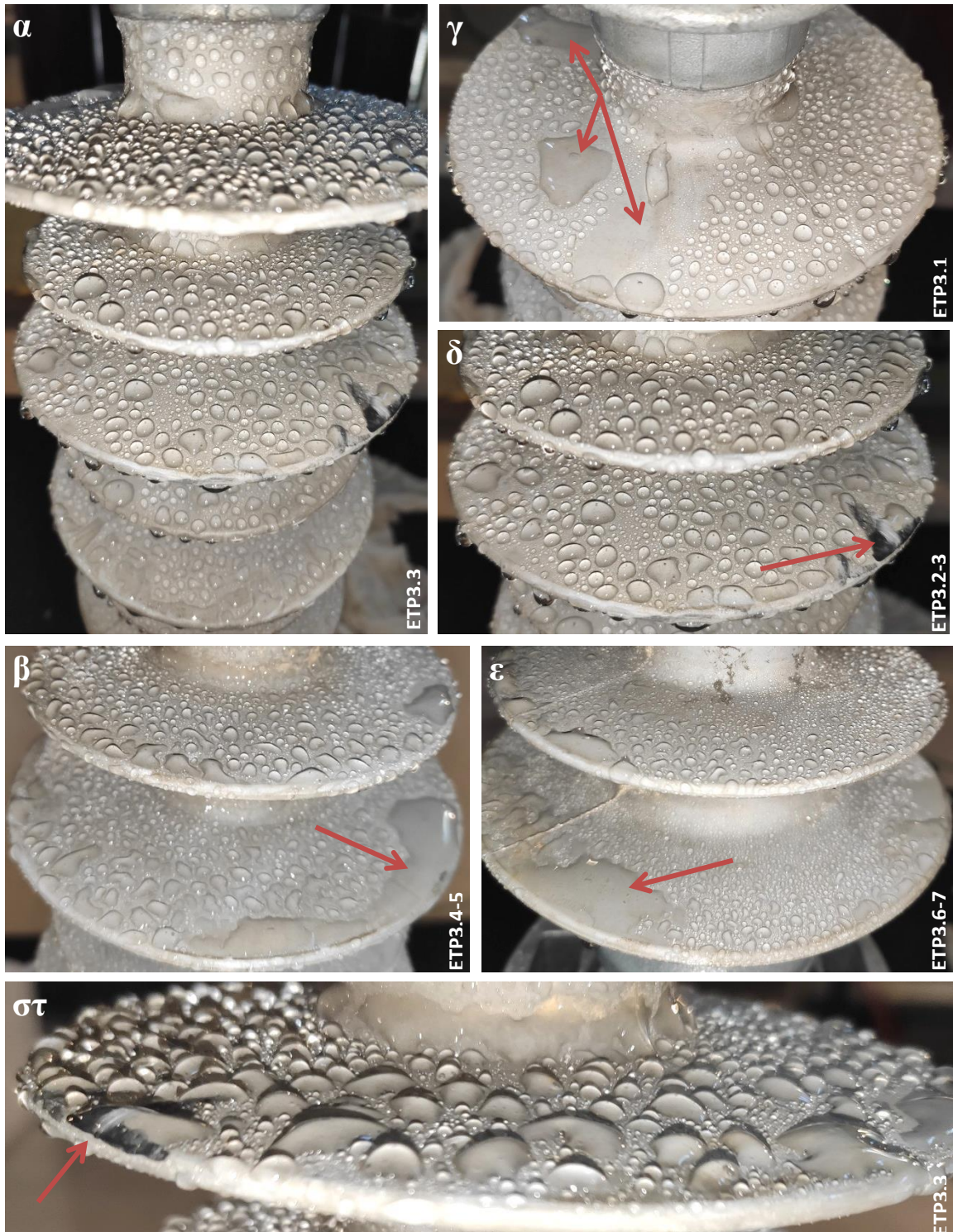
Εικόνα 4.17 Τσάκιση κυαθίων του μονωτήρα ETP3

Τα κιάτια ETP3.1, ETP3.3 και ETP3.7 αφαιρέθηκαν από το μονωτήρα με τη βοήθεια κοπιδιού και κατά τη διαδικασία τσάκισής τους δεν φάνηκε σημείο ρηγμάτωσης ή ρυτίδα στο σώμα τους. Τέλος, κατά τον έλεγχο σωστής συγκόλλησης βρέθηκε ότι το συνθετικό περίβλημα είναι σωστά συγκολλημένο στους ακροδέκτες του μονωτήρα. Ωστόσο, η συγκόλληση στον πυρήνα δεν ήταν η προβλεπόμενη αφού η ράβδος αποκαλύφθηκε σε ποσοστό περίπου 5% της εξεταζόμενης επιφάνειας.



Εικόνα 4.18 Έλεγχος σωστής συγκόλλησης του συνθετικού περιβλήματος

4.2.3.1 Δοκιμές υδροφοβικότητας



Εικόνα 4.19 Δοκιμή υδροφοβικότητας στον συνθετικό μονωτήρα ETP3

Στο πλαίσιο της δοκιμής υδροφοβικότητας ο μονωτήρας ETP3 ψεκάστηκε με απιονισμένο νερό βάσει του σχετικού προτύπου [67]. Στις επιμέρους φωτογραφίες της Εικόνα 4.19 φαίνονται τα κύαθια του μονωτήρα περίπου 10 δευτερόλεπτα μετά τη

διαβροχή τους. Η γενικότερη εικόνα του περιβλήματος δείχνει ότι οι υδροφοβικές ιδιότητες του είναι σε σχετικά καλό επίπεδο δεδομένου του χρόνου λειτουργίας του στο δίκτυο. Πιο αναλυτικά, στο κυάθιο ETP3.1 (το κοντινότερο στον μεταλλικό ακροδέκτη του υπό τάση αγωγού) ανήκει στην κλάση 4 διότι φαίνονται διακριτές σταγόνες νερού αλλά και σημεία επικάλυψης με υδάτινο στρώμα ($\leq 10\%$ της συνολικής επιφάνειας του κυαθίου) και υδάτινα μονοπάτια (φωτογρ. γ της Εικόνα 4.19) με φθίνουσα γωνία θ_r περίπου 0°. Το ίδιο ισχύει για τα κυάθια ETP3.5 και ETP3.7.

Στην κλάση υδροφοβικότητας 3 ανήκει το κυάθιο ETP3.3 (φωτογρ. στ και δ της Εικόνα 4.19) διότι παρατηρούνται μεν διακριτές σταγόνες στην επιφάνεια αλλά το μεγαλύτερο μέρος της καλύπτεται από σταγονίδια με ακανόνιστο σχήμα (η φθίνουσα γωνία επαφής είναι $40^\circ \geq \theta_r \geq 10^\circ$) και όχι με στρώμα νερού. Αξίζει να σημειωθεί ότι είναι εμφανή τα αποτελέσματα του μηχανισμού μεταφοράς της υδροφοβικότητας στους ρύπους του περιβλήματος και ειδικά στο βαρέως ρυπασμένο σημείο του εν λόγω κυαθίου (φωτογρ. δ και στ της Εικόνα 4.19). Στην ίδια κλάση υδροφοβικότητας μπορούν να καταταγούν τα κυάθια ETP3.2 και ETP3.4 αφού παρατηρούνται παρόμοια φαινόμενα (φωτογρ. β και δ της Εικόνα 4.19). Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζεται η κλάση υδροφοβικότητας ανά κυάθιο του μονωτήρα.

	Κυάθιο	Κλάση Υδροφοβικότητας (HC)
ETP3	.1	4
	.2	3
	.3	3
	.4	3
	.5	4
	.7	4

Πίνακας 4.5 Κατάταξη υδροφοβικότητας των κυαθίων του μονωτήρα ETP3 βάσει του IEC

62073 [67]

4.2.4 Μονωτήρας στήριξης της εταιρείας GN με αύξοντα αριθμό 4

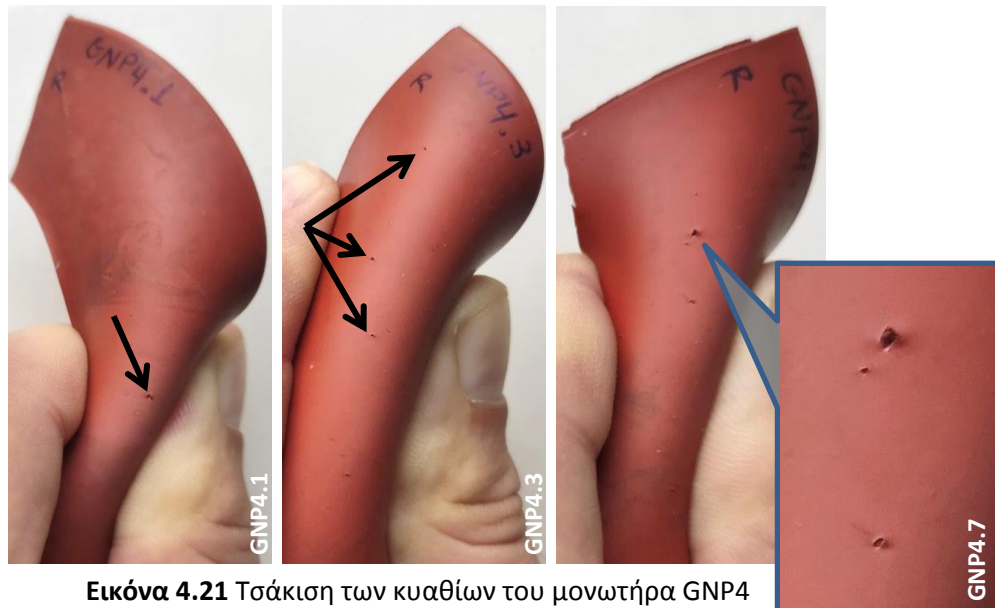
Ο συνθετικός μονωτήρας GNP4 είναι τύπου στήριξης, έχει 7 κυάθια από HTV SiR και ήταν εγκατεστημένος στο δίκτυο μέσης τάσης του ΔΕΔΔΗΕ για 5 χρόνια, από το 2014 έως το 2019. Στο περίβλημα του μονωτήρα εντοπίζεται επιφανειακή ρύπανση αποτελούμενη από περιβαλλοντικούς και υπολειμματικούς ρύπους στερεάς μορφής.

Ωστόσο οι μορφολογικές αλλοιώσεις που παρατηρούνται στο περίβλημα του μονωτήρα δεν κρίνονται σημαντικές: Δεν καταγράφονται ίχνη από δεντρίτες, χτυπήματα, τομή του



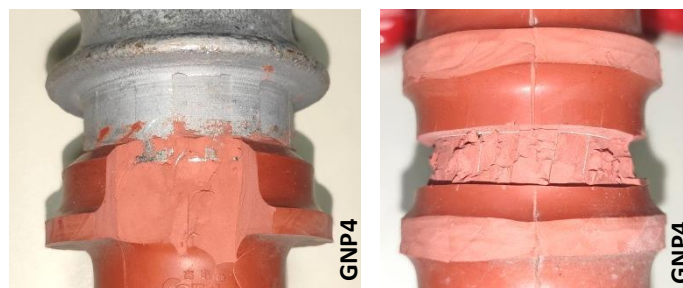
Εικόνα 4.20 Φωτογραφίες από τον οπτικό έλεγχο του μονωτήρα GNP4

πολυμερούς ή έντονες εκδορές. Περισσότερο ρυπασμένες είναι (όπως αναμενόταν) οι επάνω πλευρές των κυαθίων με τα κύαθια GNP4.2 και GNP4.4 να είναι τα περισσότερο ανομοιογενώς καλυμμένα με ρύπους και κατά τόπους κηλίδες με βαρέως τύπου ρύπους υγρής μορφής, (πιθανόν από γράσο ή λάδι μηχανής) στη περιφέρεια του πρώτου και στο άκρο του δεύτερου κυαθίου. Τέλος οι μεταλλικοί ακροδέκτες δεν εμφανίζουν ίχνη διάβρωσης ή σοβαρής φθοράς στο σώμα τους.

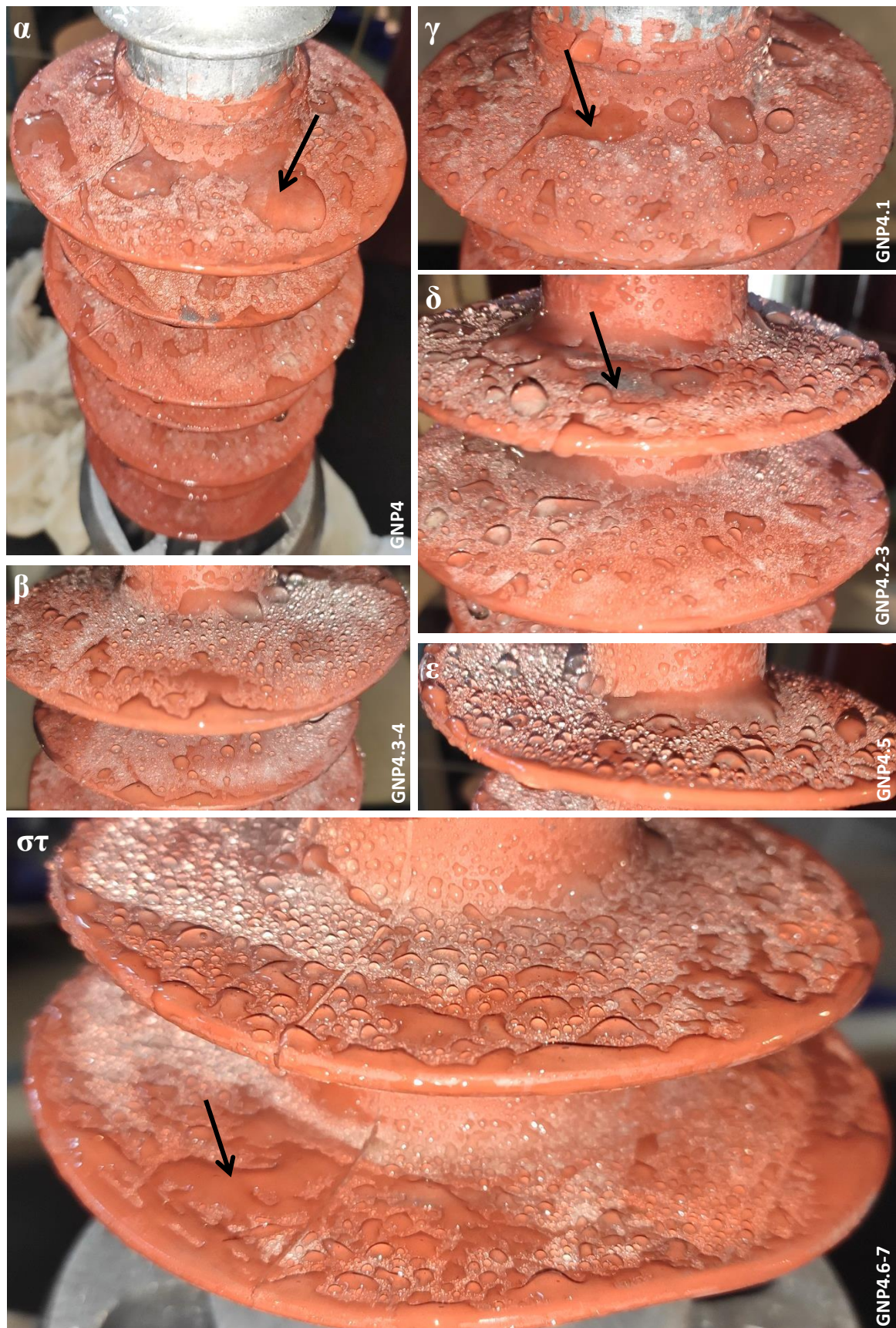


Εικόνα 4.21 Τσάκιση των κυαθίων του μονωτήρα GNP4

Η τσάκιση των κυαθίων σε συνδυασμό με τη σκλήρυνση του υλικού τους λόγω γήρανσης κατέστησε εμφανή μια κατασκευαστική ατέλεια η οποία μπορεί να επιδεινώσει και να επιταχύνει τους μηχανισμούς γήρανσης κατά τη λειτουργία του μονωτήρα: παρατηρήθηκαν (στην δεξιά πλευρά των κυαθίων) κενά στο περίβλημα τα οποία προέρχονται πιθανόν είτε από φυσαλίδες αέρα παγιδευμένου στο σώμα του ελαστομερούς από τη διαδικασία παραγωγής του (βλ. Εικόνα 4.21) είτε από απώλειες πίεσης ή κακώς στερεωμένου καλουπιού κατά τη διαδικασία της χύτευσης. Το φαινόμενο αυτό συχνά συνοδεύεται με κακή συγκόλληση του περιβλήματος στη ράβδο ή/και στους ακροδέκτες [65]. Πράγματι, το συνθετικό περίβλημά βρέθηκε σωστά



Εικόνα 4.22 Έλεγχος σωστής συγκόλλησης του συνθετικού περιβλήματος του GNP4



Εικόνα 4.23 Δοκιμή υδροφοβικότητας στον συνθετικό μονωτήρα GNP4

συγκολλημένο στη ράβδο αλλά σε ποσοστό περίπου 40% ανεπαρκώς αρμοσμένο στον άνω μεταλλικό ακροδέκτη του μονωτήρα (βλ. Εικόνα 4.22).

4.2.4.1 Δοκιμή υδροφοβικότητας

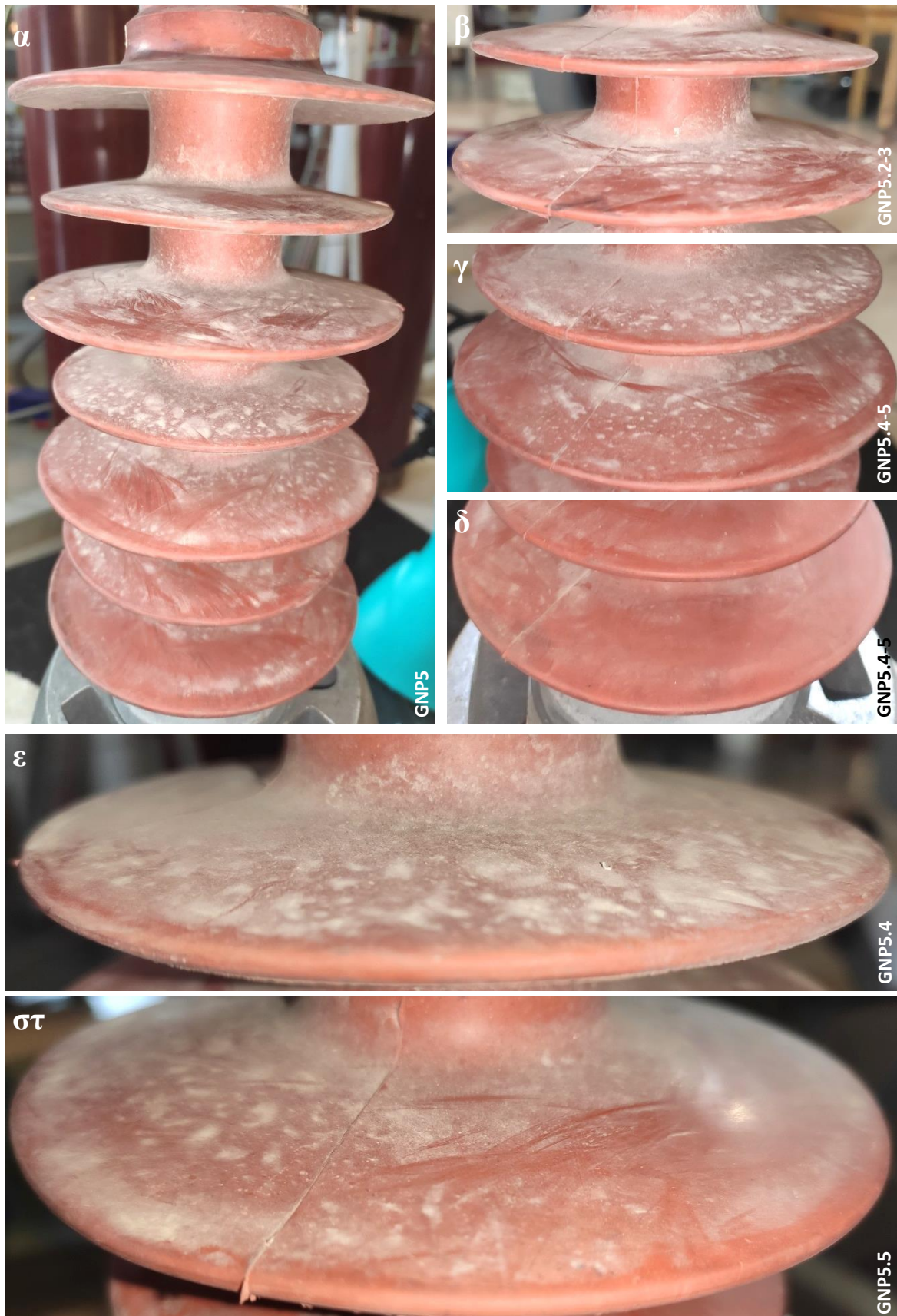
Στις επιμέρους φωτογραφίες της Εικόνα 4.23 παρατηρούμε τα κυάθια του μονωτήρα περίπου 10 δευτερόλεπτα μετά τη διαβροχή με ψεκασμό με απιονισμένο νερό. Η γενικότερη εικόνα του περιβλήματος του μονωτήρα δείχνει ότι οι υδροφοβικές ιδιότητες του έχουν μειωθεί αναλογικά με τα έτη λειτουργίας του στο δίκτυο μέσης τάσης. Πρέπει όμως να αξιολογηθεί το γεγονός ότι παρά τους στερεούς ρύπους οι οποίοι έχουν επικαθίσει στο περίβλημα η ιδιότητα μεταφοράς της υδροφοβικότητας του υλικού προς το στρώμα ρύπων καθιστά τον μονωτήρα λειτουργικό. Τα κυάθια GNP4.1 (φωτογρ. γ της Εικόνα 4.23) GNP4.7 (φωτογρ. στ της Εικόνα 4.23) και GNP4.4 μπορούν να καταταγούν στην κλάση υδροφοβικότητας 4 αφού φαίνονται διακριτές σταγόνες νερού παράλληλα όμως και σημεία επικάλυψης του περιβλήματος με υδάτινο στρώμα ($\leq 10\%$ της συνολικής επιφάνειας του κυαθίου) και υδάτινα μονοπάτια, ειδικά στην περιφερειακή αιχμή τους. Τα μεσαία κυάθια του μονωτήρα GNP4.2 (φωτογρ. δ της Εικόνα 4.23) GNP4.3 (φωτογρ. β της Εικόνα 4.23) είναι σε καλύτερη κατάσταση: το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας καλύπτεται από διακριτά σταγονίδια με ακανόνιστο σχήμα.

	Κυάθιο	Κλάση Υδροφοβικότητας (HC)
GNP4	.1	4
	.2	3
	.3	3
	.4	4
	.7	4

Πίνακας 4.6 Κατάταξη υδροφοβικότητας των υπό μελέτη κυαθίων του μονωτήρα GNP4 βάσει του προτύπου IEC 62073 [67]

4.2.5 Μονωτήρας στήριξης της εταιρείας GN με αύξοντα αριθμό 5

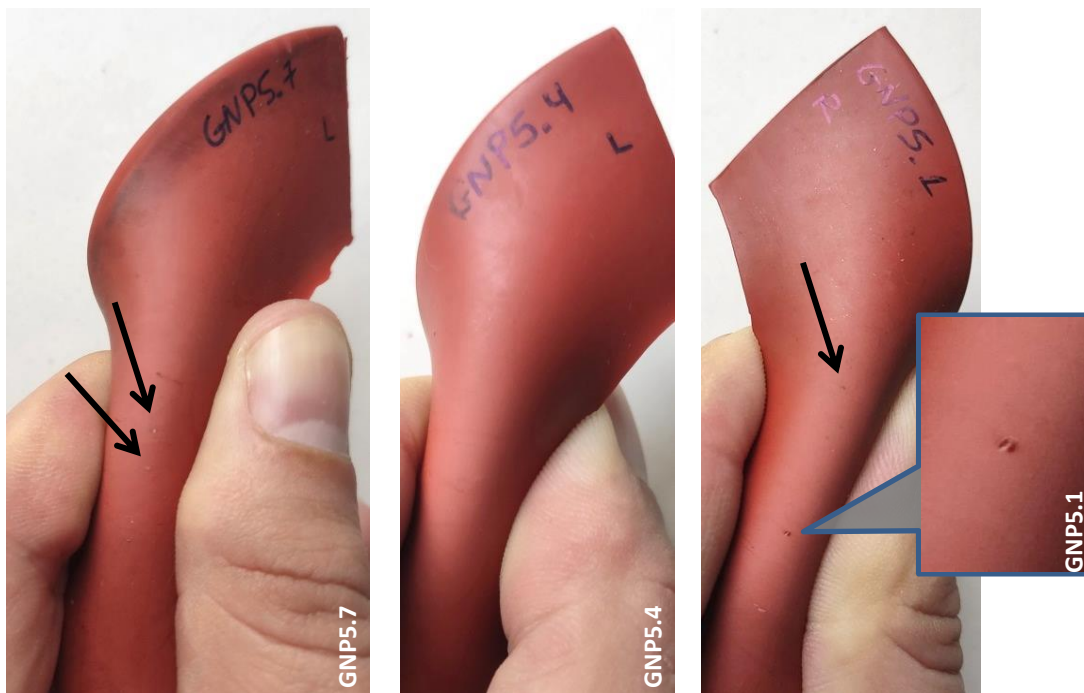
Ο συνθετικός μονωτήρας GNP5 είναι τύπου στήριξης, το περίβλημα του έχει 7 κυάθια από HTV SiR και ανήκει στον ίδιο κατασκευαστή με τον GNP4 ο οποίος εξετάστηκε στην προηγούμενη υποενότητα.



Εικόνα 4.24 Φωτογραφίες από τον οπτικό έλεγχο του συνθετικού μονωτήρα GNP5

Ήταν εγκατεστημένοι στο δίκτυο μέσης τάσης του ΔΕΔΔΗΕ για 3 χρόνια, από το 2017 έως το 2020. Στο περίβλημα του μονωτήρα υπάρχουν επικαθίσεις επιφανειακής ρύπανσης στερεάς μορφής οι σχηματισμοί της οποίας φανερώνουν παρουσία νερού ή υδατονέφωσης. Δεν εντοπίζονται μορφολογικές αλλοιώσεις στο περίβλημα, το οποίο εν γένει, δείχνει να είναι σε καλή κατάσταση: Δεν υπάρχουν εκδορές ούτε σημάδια από χτυπήματα στο σώμα του περιβλήματος. Και εδώ, περισσότερο ρυπασμένο είναι (όπως αναμενόταν) το άνω κεντρικό μέρος των κυαθίων.

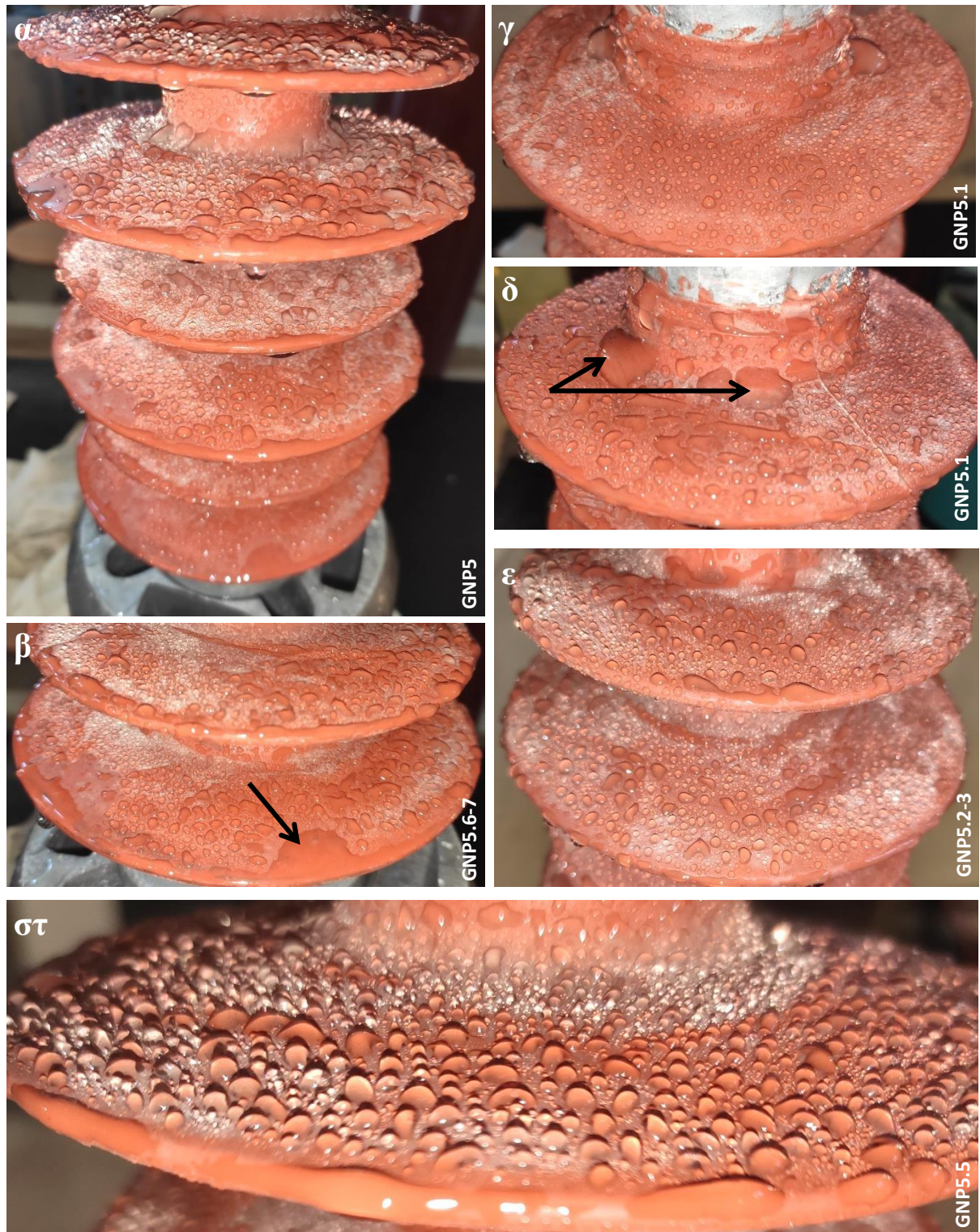
Αναφορικά με τα εξεταζόμενα κυάθια του μονωτήρα, κατά την τσάκιση τους (Εικόνα 4.25) δεν εντοπίστηκαν ρηγματώσεις ή ρυτίδες, ωστόσο παρατηρήθηκαν κενά στο περίβλημα (κατασκευαστική ατέλεια) όμοια με αυτά που εντοπίστηκαν στο μονωτήρα GNP4 (παρόλο που έχουν διαφορετική χρονολογία κατασκευής).



Εικόνα 4.25 Τσάκιση των κυαθίων του μονωτήρα GNP5

4.2.5.1 Δοκιμές υδροφοβικότητας

Στο πλαίσιο της δοκιμής υδροφοβικότητας ο μονωτήρας GNP5 ψεκάστηκε με απιονισμένο νερό βάσει του σχετικού προτύπου [67]. Στις φωτογραφίες της Εικόνα 4.26 φαίνονται τα κυάθια του μονωτήρα περίπου 10 δευτερόλεπτα μετά τη διαβροχή τους. Η γενικότερη εικόνα του περιβλήματος του μονωτήρα δείχνει ότι οι



Εικόνα 4.26 Δοκιμή υδροφοβικότητας του μονωτήρα GNP5

υδροφοβικές του ιδιότητες είναι σε αρκετά καλό επίπεδο, γεγονός αναμενόμενο δεδομένου του μικρού χρόνου παραμονής και λειτουργίας του GNP5 στο δίκτυο μέσης τάσης. Σε όλες τις περιπτώσεις το φαινόμενο της μεταφοράς της υδροφοβίας από το

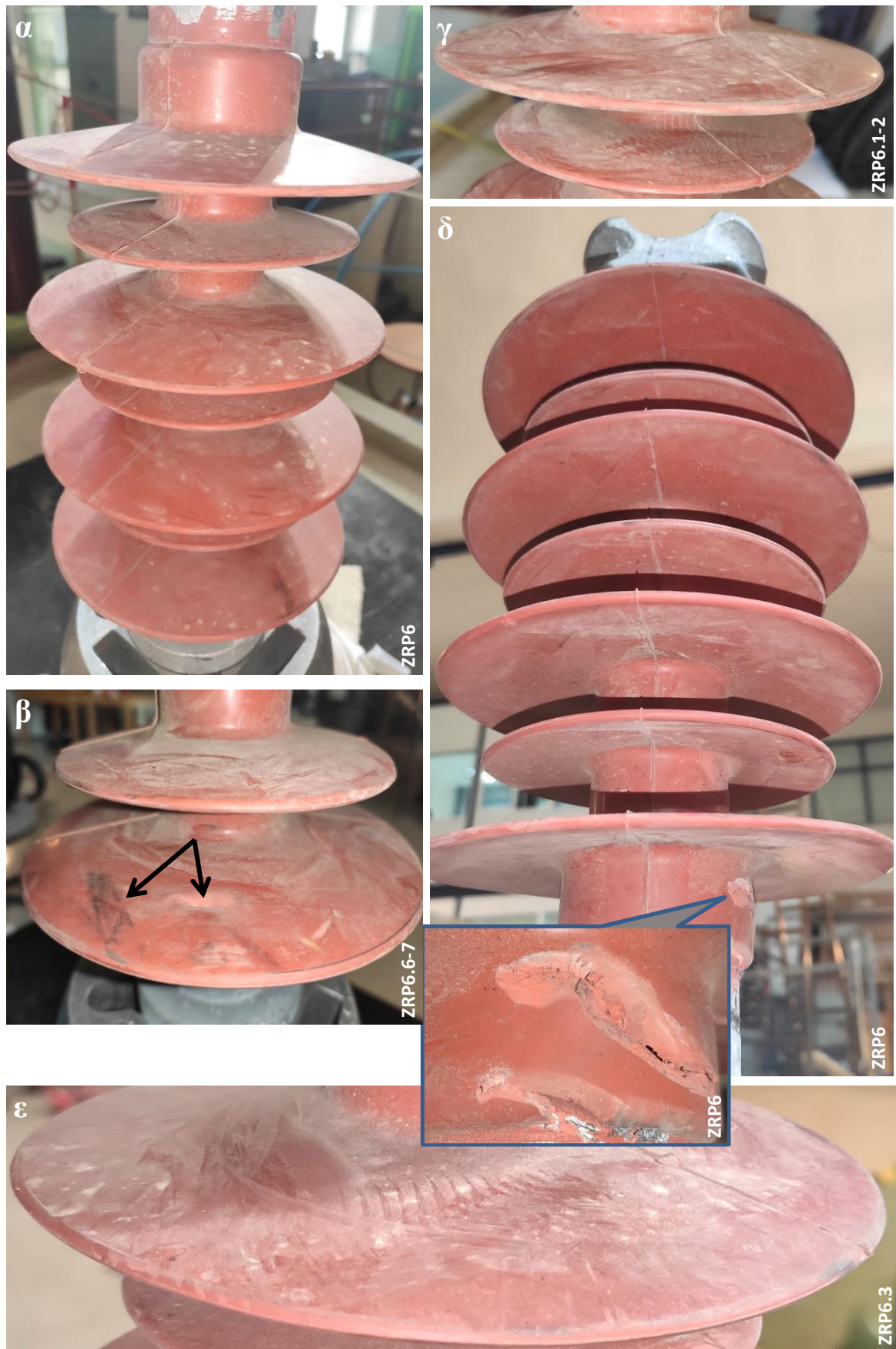
SiR στο στρώμα ρύπων είναι εμφανές. Πιο συγκεκριμένα, στο μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας των ακραίων κυαθίων GNP5.1 και GNP5.7 (βλ. Εικόνα 4.26 φωτογρ. γ και β αντίστοιχα) καθώς και στο κυάθιο GNP5.3 παρατηρούνται – παρά το στρώμα ρύπων - διακριτές σταγόνες ακανόνιστου σχήματος. Στην περιφέρεια του GNP5.7 (βλ. Εικόνα 4.26 φωτογρ. β) υπάρχουν μικρές επιφάνειες με στρώματα νερού, όμως αυτό μπορεί να αποδοθεί κατά ένα μέρος - αφού το ίδιο παρατηρείται και στα GNP5.3 και GNP5.5 - στο σχήμα του κυαθίου το οποίο δεν διευκολύνει την αποστράγγιση του νερού. Στα δε κυάθια GNP5.4 και GNP5.5 (στο μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειάς τους) παρατηρούνται διακριτά σταγονίδια τα οποία αποκλίνουν από τη σφαιρική μορφή πλην όμως διατηρούν κανονικό σχήμα (με φθίνουσα γωνία επαφής 40° με 60°). Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζεται η κλάση υδροφοβικότητας ανά κυάθιο του μονωτήρα.

	Κυάθιο	Κλάση Υδροφοβικότητας (HC)
GNP5	.1	3
	.3	3
	.4	2
	.5	2
	.7	4

Πίνακας 4.7 Κατάταξη υδροφοβικότητας των κυαθίων του μονωτήρα GNP5 βάσει του προτύπου IEC 62073 [67]

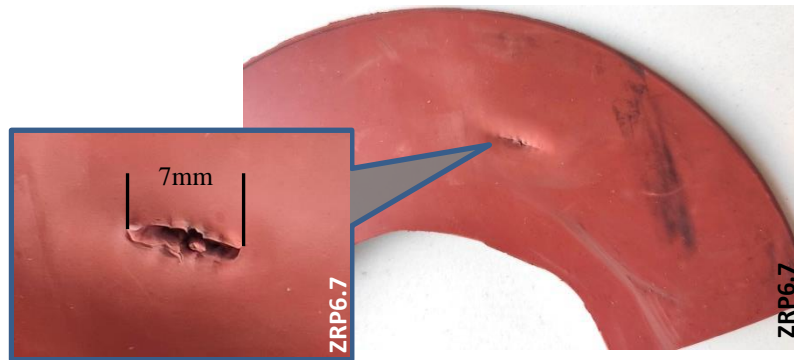
4.2.6 Μονωτήρας στήριξης της εταιρείας ZR με αύξοντα αριθμό 6

Ο ZRP6 είναι μονωτήρας τύπου στήριξης, έχει 7 κυάθια και ονομαστική μέγιστη αντοχή σε κάμψη (Specified Cantilever Load) 11kN. Ο συνολικός χρόνος εγκατάστασης και λειτουργίας του στο δίκτυο μέσης τάσης είναι 1,5 έτος. Στο περίβλημα του μονωτήρα εντοπίζεται ελαφρά επιφανειακή ρύπανση αποτελούμενη από στερεούς και υγρούς υπολειμματικούς ρύπους. Δεν εντοπίζονται ίχνη από αγωγίμες οδεύσεις άνθρακα, ωστόσο υπάρχουν κατά τόπους μορφολογικές αλλοιώσεις στο περίβλημα του μονωτήρα. Στην κάτω πλευρά του κυαθίου ZRP6.7 εντοπίζονται χτύπημα και εκδορά του πολυμερούς στο σημείο του κορμού του μονωτήρα (βλ. Εικόνα 4.27 φωτογρ. δ). Η εκδορά είναι αρκετά βαθιά ώστε να αποκαλυφθεί ο ακροδέκτης και ο πυρήνας του.



Εικόνα 4.27 Φωτογραφίες από τον οπτικό έλεγχο του μονωτήρα ZRP6

Επίσης, στην επιφάνεια του ίδιου κυαθίου εντοπίζεται σχισμή πιθανόν από χτύπημα, μήκους 7mm και βάθους 1,5mm (βλ. Εικόνα 4.28) αλλά και υπολείμματα υγρών ρύπων και τοπικός αποχρωματισμός (βλ. Εικόνα 4.27 φωτογρ. β). Στα υπόλοιπα κυάθια εντοπίζονται ανομοιογενώς κατανεμημένοι επιφανειακοί ρύποι σωρευμένοι επί το πλείστον στις άνω πλευρές των κυαθίων.



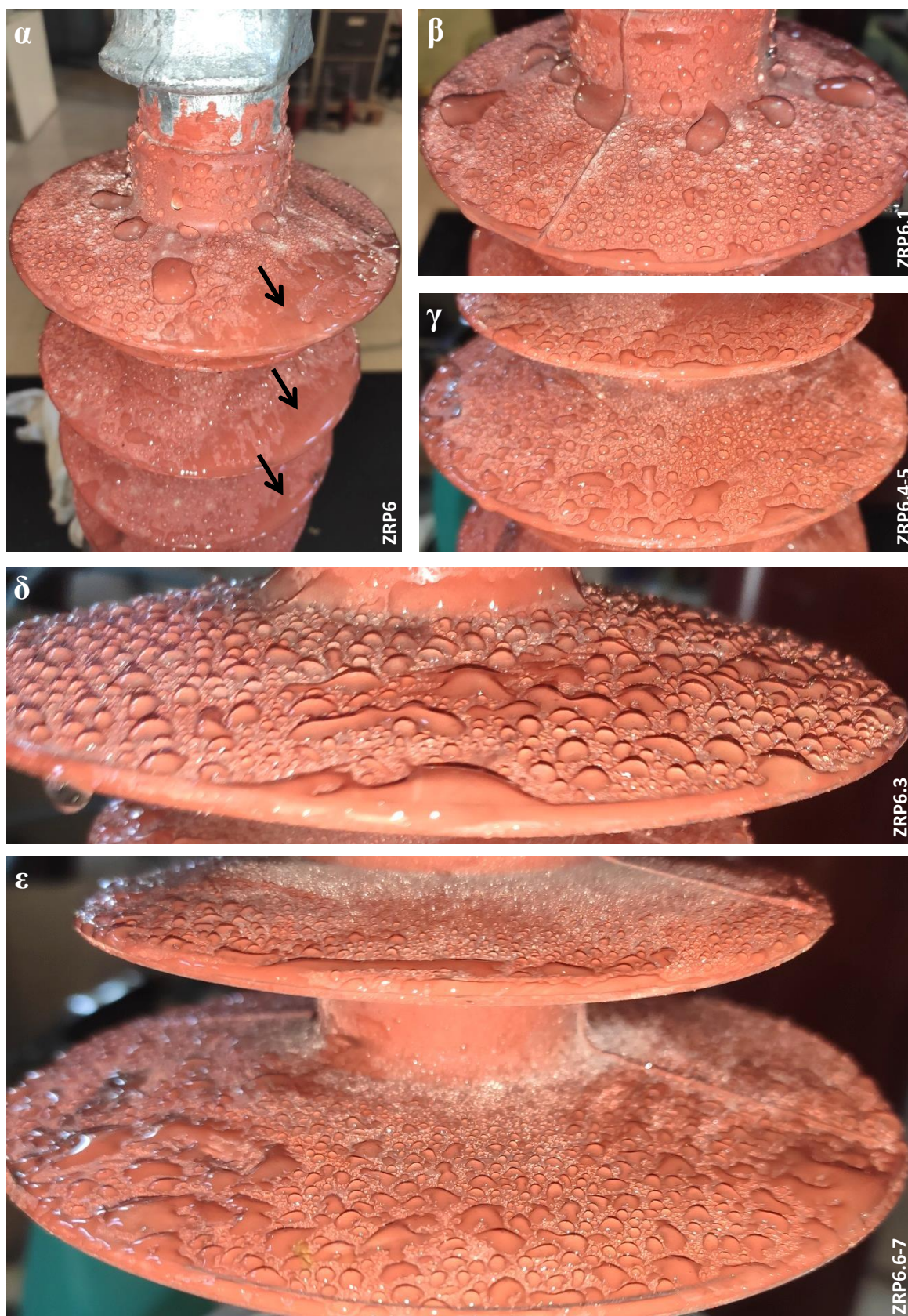
Εικόνα 4.28 Η άνω επιφάνεια του κυαθίου ZRP6.7

Τα ZRP6.1, ZRP6.3 και ZRP6.7 αφαιρέθηκαν από το σώμα του μονωτήρα με τη βοήθεια κοπιδιού και καθαρίστηκαν με απιονισμένο νερό. Κατά την τσάκιση τους δεν καταγράφηκαν σοβαρές αλλοιώσεις (ρηγματώσεις, ρυτίδες, κτλ.) παρά μόνον μικρές αποχρωματισμένες κηλίδες (οι περισσότερες στο ZRP6.1) και κυκλικά στίγματα πιθανόν από το εκμαγείο κατασκευής.



Εικόνα 4.29 Τσάκιση των κυαθίων του μονωτήρα ZRP6

4.2.6.1 Δοκιμές υδροφοβικότητας



Εικόνα 4.30 Δοκιμή υδροφοβικότητας στον συνθετικό μονωτήρα ZRP6

Κατά τις δοκιμές υδροφοβικότητας ο ZRP6 ψεκάστηκε με απιονισμένο νερό από την προβλεπόμενη απόσταση, βάσει του σχετικού προτύπου. [67] Στην Εικόνα 4.30 φαίνονται τα κυάθια του μονωτήρα περίπου 10 δευτερόλεπτα μετά τη διαβροχή. Η γενικότερη εικόνα του περιβλήματος του μονωτήρα δείχνει ότι οι υδροφοβικές του ιδιότητες έχουν μειωθεί αναλογικά με το χρόνο λειτουργίας του στο δίκτυο. Ειδικότερα, στην αριστερή πλευρά, κοντά στην περιφέρεια των άνω και μέσων κυαθίων (ZRP6.1, ZRP6.2, ZRP6.3 και λιγότερο έντονα στο ZRP6.5) εντοπίζεται σημείο στο οποίο οι υδροφοβικές ιδιότητες έχουν υποβαθμιστεί ραγδαία (βλ. Εικόνα 4.30 φωτογρ. α).

Τα κυάθια ZRP6.1 και ZRP6.3 (φωτογρ. α, β, δ της Εικόνα 4.30) μπορούν να καταταγούν στην κλάση υδροφοβικότητας 4 αφού παρατηρούνται διακριτές σταγόνες νερού παράλληλα όμως και σημεία επικάλυψης του περιβλήματος με υδάτινο στρώμα ($\leq 10\%$ της συνολικής επιφάνειας του κυαθίου).

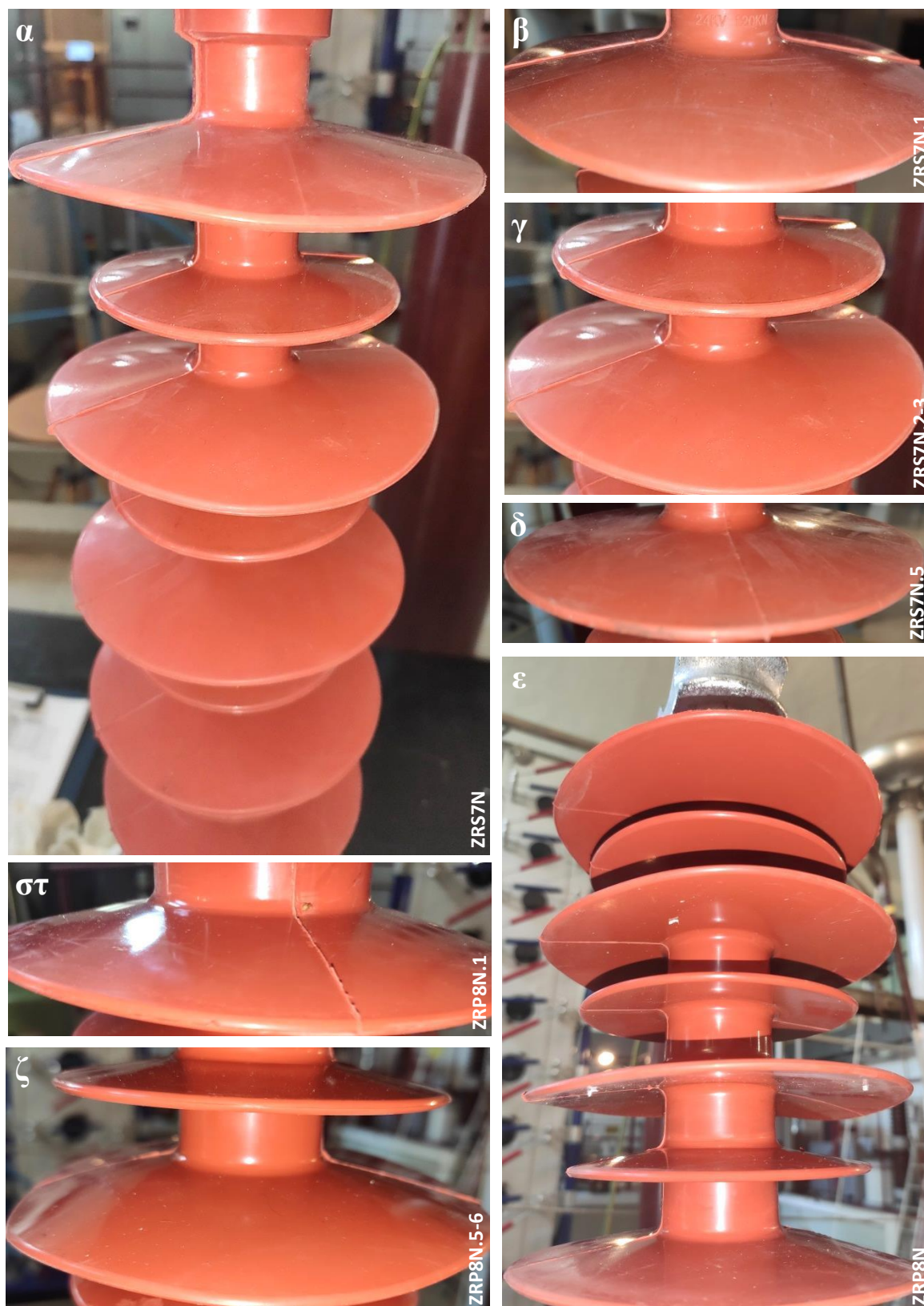
Στα κυάθια ZRP6.4, ZRP6.5 και ZRP6.7 παρατηρούνται πάνω από το στρώμα των στερεών ρύπων, διακριτά σταγονίδια τα οποία αποκλίνουν από τη σφαιρική μορφή πλην όμως διατηρούν κανονικό σχήμα (με φθίνουσα γωνία επαφής μεταξύ 40° και 60°). Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζεται η κλάση υδροφοβικότητας ανά κυάθιο του μονωτήρα

	Κυάθιο	Κλάση Υδροφοβικότητας (HC)
ZRP6	.1	4
	.3	4
	.4	3
	.5	3
	.7	3

Πίνακας 4.8 Κατάταξη υδροφοβικότητας των κυαθίων του μονωτήρα ZRP6 βάσει του προτύπου IEC 62073 [67]

4.2.7 Μονωτήρες ανάρτησης με αύξοντα αριθμό 7 & στήριξης με αύξοντα αριθμό 8 της εταιρείας ZR

Οι συνθετικοί μονωτήρες ZRS7N και ZRP8N κατασκευάστηκαν (από την ίδια εταιρεία κατασκευής) το 2018 και δεν έχουν εγκατασταθεί και τεθεί σε λειτουργία. Ως εκ τούτου, το συνθετικό τους περίβλημα και οι ακροδέκτες τους δε φέρουν σημάδια γήρανσης ή φθοράς. Ο ZRS7N είναι μονωτήρας ανάρτησης με ονομαστική μέγιστη



Εικόνα 4.31 Φωτογραφίες από τον οπτικό έλεγχο των μονωτήρων ZRS7N και ZRP8N

αντοχή σε εφελκυσμό (Specified Mechanical Load) 120kN και το περίβλημά του φέρει 9 κυάθια από SiR. Ο ZRP8N είναι μονωτήρας στήριξης με ονομαστική μέγιστη αντοχή σε κάμψη (SCL) 11kN.

Από τον έλεγχο σωστής συγκόλλησης που έγινε στους μονωτήρες βρέθηκε ότι το περίβλημα είναι επαρκώς συγκολλημένο στον πυρήνα αλλά και στους ακροδέκτες και των δυο μονωτήρων.



Εικόνα 4.32 Έλεγχος σωστής συγκόλλησης του συνθετικού περιβλήματος στους ακροδέκτες

4.2.7.1 Δοκιμές υδροφοβικότητας στον ZRS7N

Στο πλαίσιο της δοκιμής υδροφοβικότητας οι μονωτήρες ZRS7N και ZRP8N ψεκάστηκαν με απιονισμένο νερό βάσει του σχετικού προτύπου. [67] Τα κυάθια φωτογραφήθηκαν περίπου 10 δευτερόλεπτα αργότερα και η γενικότερη εικόνα του περιβλήματος του μονωτήρα δείχνει ότι οι υδροφοβικές του ιδιότητες είναι σε καλό επίπεδο. Εντοπίζεται καλή υδροφοβική συμπεριφορά και στις περιφερειακές αιχμές κάθε κυαθίου, σημεία στα οποία οι αποξηλωμένοι από το δίκτυο μονωτήρες είχε εμφανώς υποβαθμιστεί. Ωστόσο, όλα τα κυάθια κατηγοριοποιούνται στην κλάση 2 παρά στην κλάση 1 όπως αναμενόταν για καινούριους, μη χρησιμοποιημένους μονωτήρες. Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζεται η κλάση υδροφοβικότητας ανά κυάθιο του μονωτήρα.

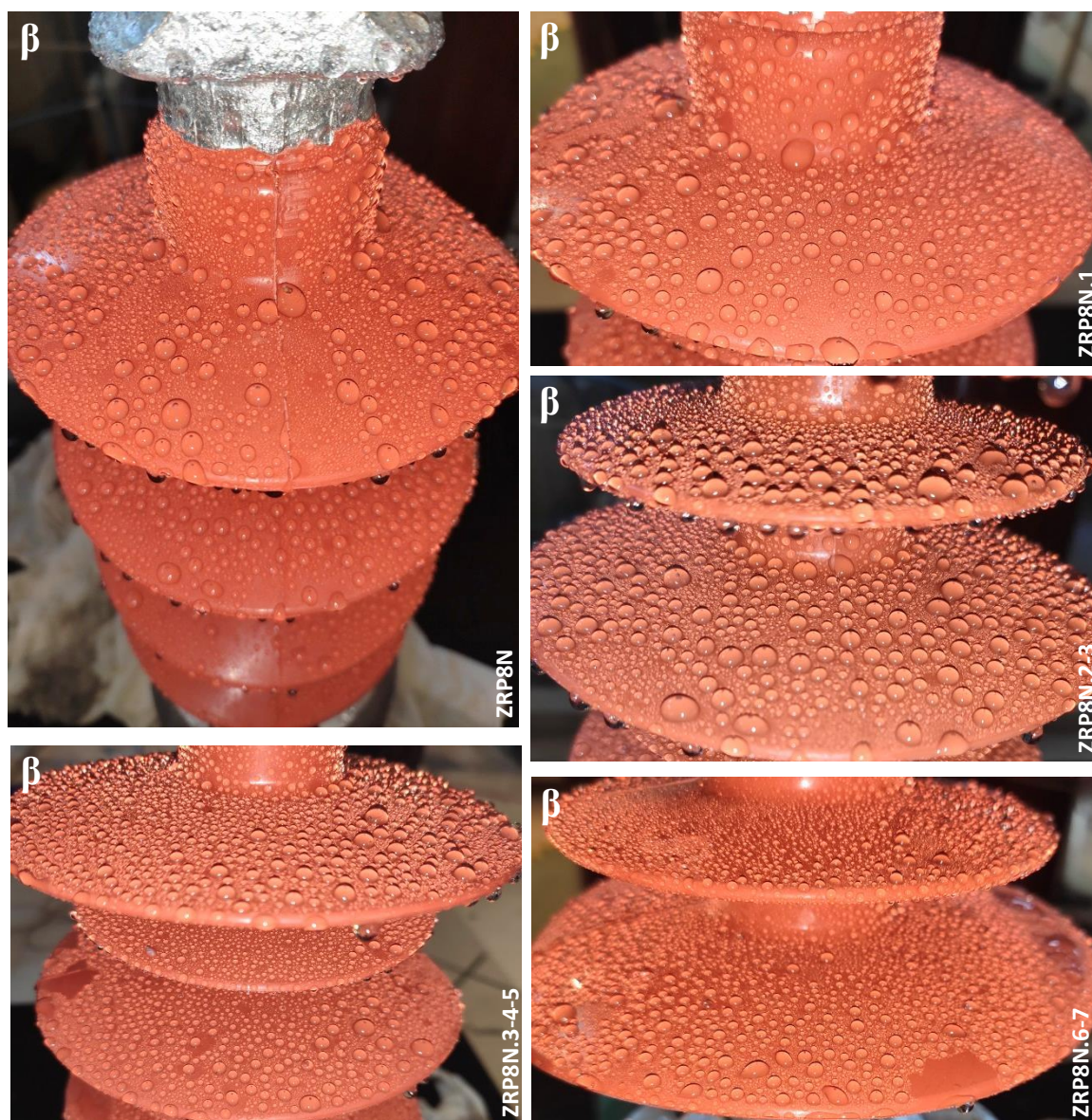
	Κυάθιο	Κλάση Υδροφοβικότητας (HC)
ZRS7N	.1	2
	.3	2
	.5	2
	.9	2
ZRP8N	.1	2
	.5	2
	.7	2

Πίνακας 4.9 Κατάταξη υδροφοβικότητας των κυαθίων του μονωτήρα ZRP6 βάσει του προτύπου IEC 62073 [67]



Εικόνα 4.33 Δοκιμή υδροφοβικότητας στον συνθετικό μονωτήρα ZRS7N

Δοκιμές υδροφοβικότητας στον ZRP8N



Εικόνα 4.34 Δοκιμή υδροφοβικότητας στον συνθετικό μονωτήρα ZRP8N

4.3 Μετρήσεις Πυκνότητας

4.3.1 Προετοιμασία των δοκιμών

Μετά το πέρας των δοκιμών υδροφοβικότητας αφαιρέθηκαν τουλάχιστον τρία κυάθια από κάθε μονωτήρα (τα δύο ακραία και ένα ή δύο κυάθια από τη μέση του) με τη βοήθεια κοπιδιού, καθαρίστηκαν επιμελώς με απιονισμένο νερό και ύφασμα για να απομακρυνθούν τυχόν ξένα σώματα και ρύποι, και παρέμειναν σε θερμοκρασία δωματίου, προστατευμένα από το ηλιακό φως για 24 ώρες ώστε να στεγνώσουν.



Εικόνα 4.35 Αφαίρεση των υπό μελέτη κυαθίων από τους συνθετικούς μονωτήρες

Η μέτρηση της πυκνότητας του ελαστομερούς περιβλήματος σιλικόνης των μονωτήρων έγινε με τη μέθοδο Β του προτύπου ISO 2781:2018 [69]. Από κάθε κυάθιο έγινε αποκοπή, λήψη και προετοιμασία τριών δοκιμών, μάζας τουλάχιστον 2,5gr (συνήθως από 2,6gr έως 3,4gr – βλ. Πίνακας 4.10) έκαστο. Η λήψη των τριών δοκιμών έγινε από την ίδια περιοχή μιας συγκεκριμένης πλευράς του κάθε μονωτήρα. Με τον τρόπο αυτό επιδιώκουμε την μικρότερη τυπική απόκλιση και κατά συνέπεια την ομοιογένεια του τελικού αποτελέσματος.

Στη συνέχεια κάθε δοκίμιο τεμαχίστηκε σε κομμάτια με τις δύο διαστάσεις όχι μεγαλύτερες από 4mm και την τρίτη διάσταση του στα 6mm.

Στον πίνακα που ακολουθεί καταγράφονται οι μάζες των δοκιμών οι οποίες μετρήθηκαν μετά τον τεμαχισμό τους.

ZBS1	.1		.2		.3		.4		.9	
	L	3.615	L	2.947	L	3.531	L	2.921	L	3.848
	R	3.062	R	2.841	R	4	R	2.992	R	3.079
	LR	2.941	LR	2.614	LR	2.965	LR	2.75	LR	2.766
ZBS2	.1		.2		.3		.5		.9	
	L	3.783	L		L	3.36	L	3.364	L	2.803
	R	3.592	R		R	3.791	R	3.732	R	3.131
	LR	3.19	LR		LR	3.765	LR	3.162	LR	3.108
ETP3	.1		.2		.3		.7			
	L	3.531	L		L	3.978	L	2.731		
	R	3.756	R		R	3.851	R	3.377		
	LR	3.897	LR		LR	3.441	LR	2.702		
GNP4	.1		.2		.3		.4		.7	
	L	2.622	L		L	3.792	L	2.715	L	3.482
	R	3.992	R		R	3.324	R	3.272	R	2.998
	LR	3.005	LR		LR	3.37	LR	2.83	LR	3.037
GNP5	.1		.2		.3		.4		.7	
	L	2.68	L	2.652	L		L	2.803	L	3.349
	R	2.791	R	2.795	R		R	2.934	R	3.19
	LR	3.432	LR	2.595	LR		LR	3.039	LR	3.082
ZRP6	.1		.2		.3		.7			
	L	2.887	L		L	3.71	L	2.657		
	R	3.235	R		R	3.762	R	3.256		
	LR	3.258	LR		LR	3.701	LR	2.753		
ZRS7N	.1		.2		.3		.5		.9	
	L	2.865	L		L	2.85	L	3.007	L	3.623
	R	3.013	R		R	3.201	R	2.697	R	2.895
	LR	2.962	LR		LR	3.071	LR	2.7	LR	3.056
ZRP8N	.1		.5		.6		.7			
	L	2.739	L	3.144	L	2.874	L	3.079		
	R	2.503	R	2.6	R	2.598	R	2.803		
	LR	2.72	LR	2.618	LR	2.759	LR	2.58		

Πίνακας 4.10 Οι μάζες των δοκιμών που ελήφθησαν από τα κυάθια των μονωτήρων

4.3.2 Ζυγός ακριβείας

Ο ζυγός του εργαστηρίου υψηλών τάσεων και ηλεκτρικών μετρήσεων του Ε.Μ.Π. με τον οποίο διεξήχθησαν οι μετρήσεις μάζας είναι της εταιρίας KERN μοντέλο EWJ 300-3 [86].



Εικόνα 4.36 Ο ζυγός ακριβείας KERN του εργαστηρίου υψηλών τάσεων και ηλεκτρικών μετρήσεων του ΕΜΠ

Είναι τοποθετημένος σε σταθερή, επίπεδη επιφάνεια, προστατευμένος από ρεύματα αέρα, υπερβολική θερμότητα καθώς και διακυμάνσεις της θερμοκρασίας από

Ακρίβεια μέτρησης	0,001 gr
Μέγιστη μετρούμενη μάζα	300 gr
Ελάχιστη μετρούμενη μάζα (για ζύγιση τεμαχίων)	0,002 gr
Γραμμικότητα	± 0,003 gr
Ρύθμιση	Εσωτερική
Θερμοκρασία λειτουργίας	+5°C + 40°C
Υγρασία περιβάλλοντος	max 80%
Διάμετρος πινακίου ζύγισης (από ανοξείδωτο ατσάλι)	80 mm
Μονάδες ζύγισης	g, ct, dwt, lb, mo, oz, ozt, tl

Πίνακας 4.11 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του ζυγού ακριβείας που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές [86]

θερμαντικά σώματα ή ηλιακό φως. Τέλος, με τη βοήθεια του ενσωματωμένου αλφαδιού και των ρυθμιζόμενου μήκους βάσεων στήριξής της, η συσκευή είχε ευθυγραμμιστεί πλήρως με την επιφάνεια στην οποία ήταν τοποθετημένη πριν τη διεξαγωγή των μετρήσεων.

Ο ζυγός διαθέτει γυάλινο κάλυμμα προστασίας από τη σκόνη και από ρεύματα αέρα καθώς επίσης και λειτουργία εσωτερικής αυτορύθμισης (calibration) η οποία ενεργοποιείται κάθε φορά που η συσκευή τίθεται σε θέση ON αλλά και μετά την παρέλευση καθορισμένου χρόνου λειτουργίας.

4.3.3 Διαδικασία των μετρήσεων

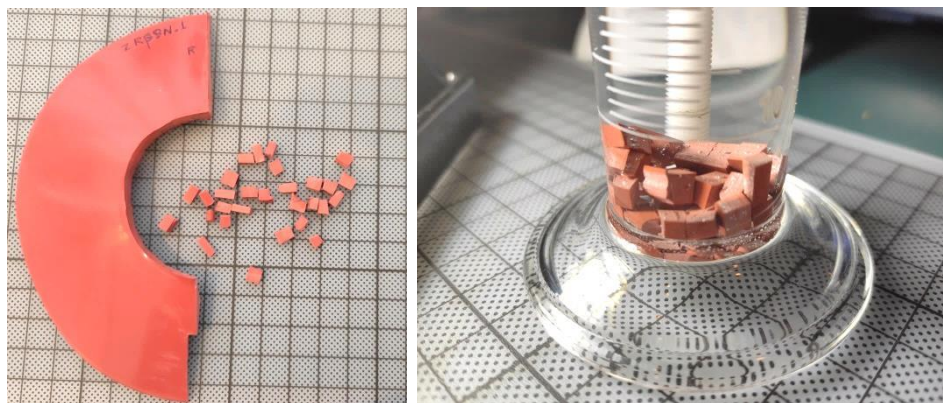
Μετά την επιμελή προετοιμασία των δοκιμίων από κάθε κυάθιο, ακολουθεί η διαδικασία της μέτρησης των μαζών m_1 , m_2 , m_3 και m_4 κατά το πρότυπο [69] όπου:

m_1 : η μάζα του ογκομετρικού σωλήνα

m_2 : η μάζα του ογκομετρικού σωλήνα μαζί με τη μάζα του δοκιμίου

m_3 : η μάζα του ογκομετρικού σωλήνα μαζί με τη μάζα του δοκιμίου και τη μάζα του νερού

m_4 : η μάζα του ογκομετρικού σωλήνα μαζί με τη μάζα του νερού



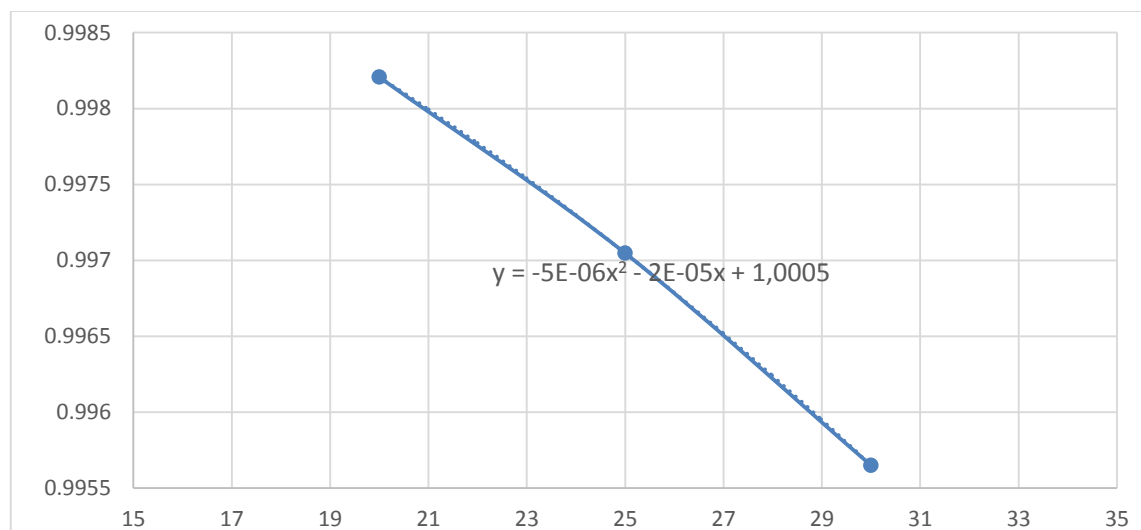
Εικόνα 4.37 Προετοιμασία του δοκιμίου από το κυάθιο ZRP8N.1 (αριστερά) και το δοκίμιο με το νερό και το αναδευτήρα στον ογκομετρικό σωλήνα

Η μάζα του ογκομετρικού σωλήνα μετρήθηκε άπαξ με τη βοήθεια του ζυγού ακριβείας. Η μάζα (m_4) του ογκομετρικού σωλήνα μαζί με τη μάζα του νερού με όγκο 60cm^3 μετρούνταν κάθε φορά αφού καταγραφεί η θερμοκρασία του νερού. Έπειτα, έγινε μέτρηση της μάζας (m_2) του ογκομετρικού σωλήνα μαζί με τη μάζα κάθε δοκιμίου. Για

τη μάζα m_3 , τοποθετούνταν τα κομμάτια του δοκιμίου στον ογκομετρικό σωλήνα και συμπληρωνόταν νερό έως ότου ο όγκος του δοκιμίου μαζί με τον όγκο του νερού να φτάσει 60cm^3 . Χρησιμοποιήθηκε απιονισμένο νερό για το ποίο υπήρχε μέριμνα να διατηρείται σε τυπική θερμοκρασία εργαστηρίου μεταξύ 21°C και 23°C .

Για τις φυσαλίδες αέρα οι οποίες προσκολλούνταν στα κομμάτια του δοκιμίου κατά τον εμβαπτισμό τους στο απιονισμένο νερό, έγινε χρήση αναδευτήρα με τη βοήθεια του οποίου ο αέρας απομακρυνόταν. Επίσης, προς ελαχιστοποίηση του σφάλματος λόγω τις τριχοειδούς ανυψώσεως του νερού στο σώμα του ογκομετρικού σωλήνα, η παρατήρηση και καταγραφή του όγκου γινόταν βάσει των κοίλων της επιφάνειας του.

Ο υπολογισμός της πυκνότητας του νερού σε συνάρτηση της θερμοκρασίας προκύπτει βάσει των τιμών του Πίνακα 2.3.



Σχήμα 4.1 Γραφική παράσταση βάσει των τιμών πυκνότητας του Πίνακα 2.3

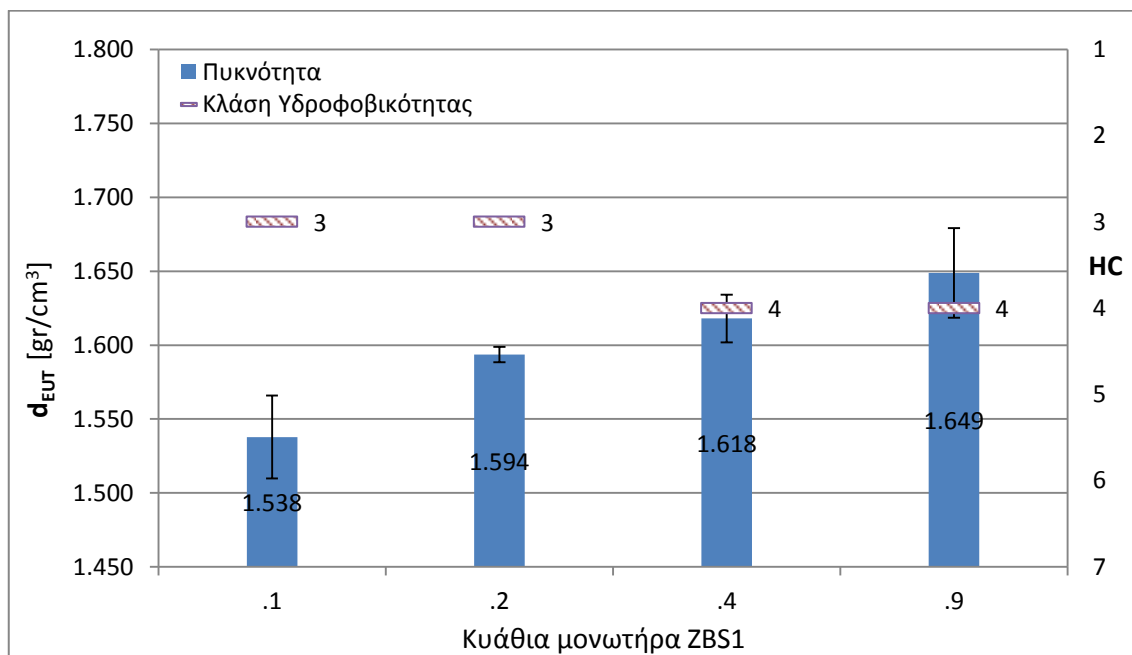
Από αυτές τις τιμές προκύπτει η παρακάτω γραφική παράσταση και βάσει αυτής η συνάρτηση πυκνότητας – θερμοκρασίας (4.1).

$$y = -5x10^{-6}x^2 - 2x10^{-5}x + 1,0005 \quad (4.1)$$

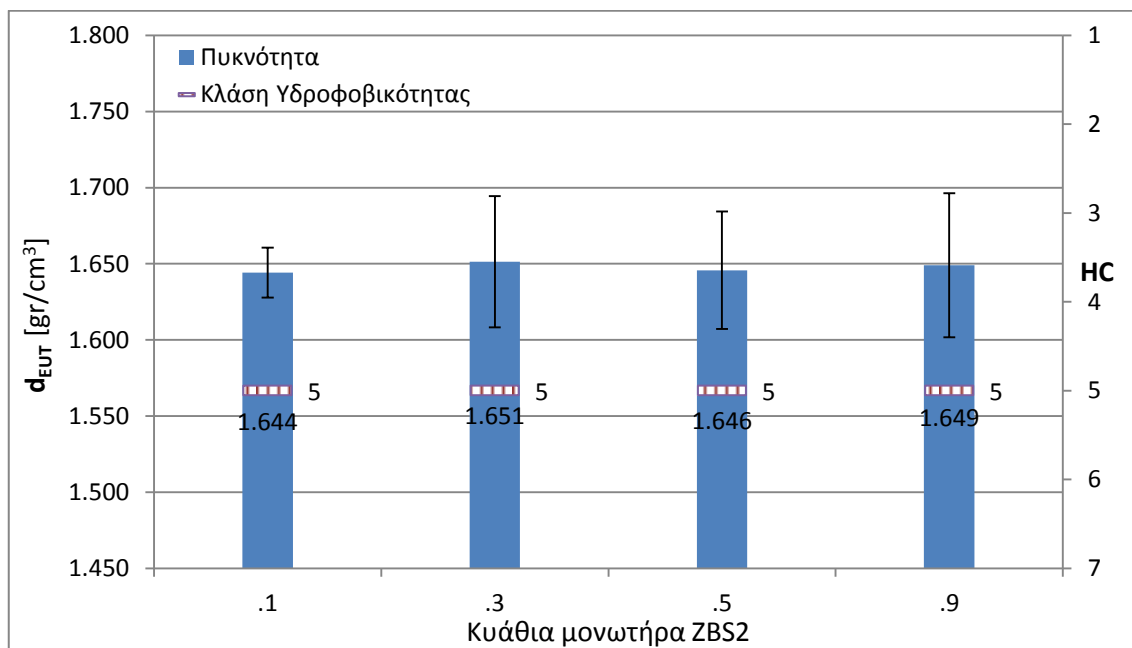
Με βάσει τα παραπάνω ο υπολογισμός της πυκνότητας του δοκιμίου προκύπτει κάθε φορά από την αναγραφόμενη στο πρότυπο σχέση (3.5). Η τελική τιμή της πυκνότητας έκαστου κυαθίου προκύπτει από τη μέση τιμή των τιμών πυκνότητας των 3 δοκιμίων.

4.3.4 Αποτελέσματα μετρήσεων

Οπτικοποιώντας τα αποτελέσματα, προκύπτουν οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις (τα αριθμητικά αποτελέσματα των μετρήσεων παρατίθενται αναλυτικά στους πίνακες στο παράρτημα τις εργασίας). Στα ιστογράμματα απεικονίζονται οι πυκνότητες που προέκυψαν από τις μετρήσεις πυκνότητας ανά κυάθιο σε συνδυασμό με τις κλάσεις υδροφοβικότητας.



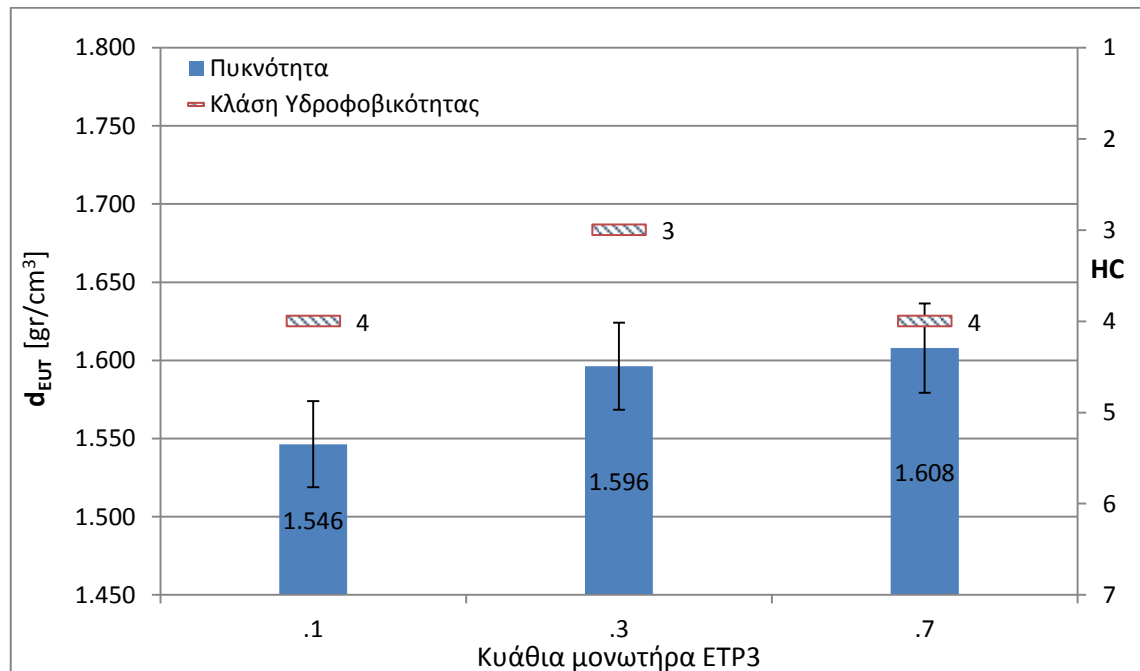
Σχήμα 4.2 Πυκνότητα και κλάση υδροφοβικότητας ανά κυάθιο του μονωτήρα ZBS1



Σχήμα 4.3 Πυκνότητα και κλάση υδροφοβικότητας ανά κυάθιο του μονωτήρα ZBS2

Στη γραφική παράσταση στο Σχήμα 4.2 παρατηρούμε ότι από τα εξεταζόμενα κυάθια στον μονωτήρα ZBS1 τη μεγαλύτερη πυκνότητα έχει το κυάθιο ZBS1.9 με $1,649 \text{ gr/cm}^3$ και τη μικρότερη το κυάθιο ZBS1.1 με $1,538 \text{ gr/cm}^3$. Η πυκνότητα του κυαθίου ZBS1.2 απέχει ελάχιστα από το πρώτο δηλαδή $0,056 \text{ gr/cm}^3$ με (τη μικρότερη) τυπική απόκλιση $0,005 \text{ gr/cm}^3$, ενώ η μετρούμενη πυκνότητα του κυαθίου ZBS1.9 απέχει από το μέσο κυάθιο $0,031 \text{ gr/cm}^3$. Αναφορικά με τις κλάσεις υδροφοβικότητας φαίνεται ότι στο μέσο και στο εγγύτερο στον αγωγό κυάθιο η κλάση είναι 4 σε αντίθεση με τα υπόλοιπα όπου έχουν καλύτερες υδροφοβικές ιδιότητες. Το γεγονός αυτό είναι πιθανόν να οφείλεται στην επίδραση του πεδίου στο υλικό.

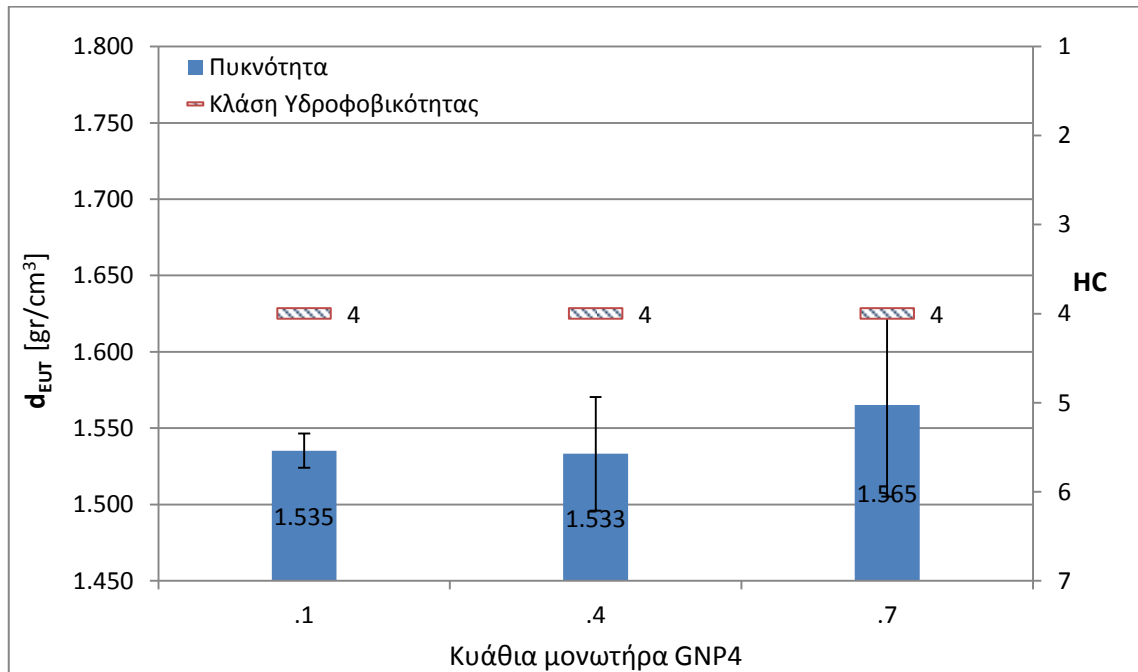
Στο μονωτήρα ZBS2 (Σχήμα 4.3), ο οποίος αποξηλώθηκε μετά από 9 χρόνια λειτουργίας, οι μετρούμενες πυκνότητες των τεσσάρων κυαθίων είναι εν γένει στο ίδιο επίπεδο μεταξύ τους με κατά μέσο όρο διαφορές της τάξης των $0,006 \text{ gr/cm}^3$. Η διασπορά των τιμών γύρω από τη μέση τιμή εδώ είναι μεγαλύτερη από τον ZBS1 και αυτό εκφράζεται τις τιμές της τυπικής απόκλισης οι οποίες κυμαίνονται από $0,016 \text{ gr/cm}^3$ έως $0,047 \text{ gr/cm}^3$ στο κυάθιο ZBS2.9. Η γήρανση του υλικού φαίνεται στη μετρούμενη κλάση υδροφοβικότητας 5, η οποία είναι κοινή για όλα τα κυάθια του μονωτήρα.



Σχήμα 4.4 Πυκνότητα και κλάση υδροφοβικότητας ανά κυάθιο του μονωτήρα ETP3

Στον μονωτήρα 3 του κατασκευαστή ET (Σχήμα 4.4) η μεγαλύτερη τιμή πυκνότητας υλικού $1,608 \text{ gr/cm}^3$ μετρήθηκε στο κυάθιο ETP3.7. Γενικά οι τιμές

πυκνότητας δείχνουν να μειώνονται από το κιάθιο ETP3.7 ως το πρώτο κιάθιο ETP3.1 το οποίο είχε κατά $0,062 \text{ gr/cm}^3$ μικρότερη τιμή δηλαδή $1,546 \text{ gr/cm}^3$ γεγονός το οποίο μπορεί να οφείλεται στη γήρανση του υλικού από παράγοντες όπως π.χ. η ηλιακή ακτινοβολία. Η τυπική απόκλιση ανά κιάθιο υπολογίστηκε $0,028 \pm 0,001 \text{ gr/cm}^3$. Τέλος, τα 2 ακραία κιάθια του μονωτήρα κατατάχθηκαν στην κλάση υδροφοβικότητας 4 ενώ το μεσαίο (ή τα περισσότερα κιάθια του κέντρου βλ. Πίνακας 4.5) στην κλάση 3.

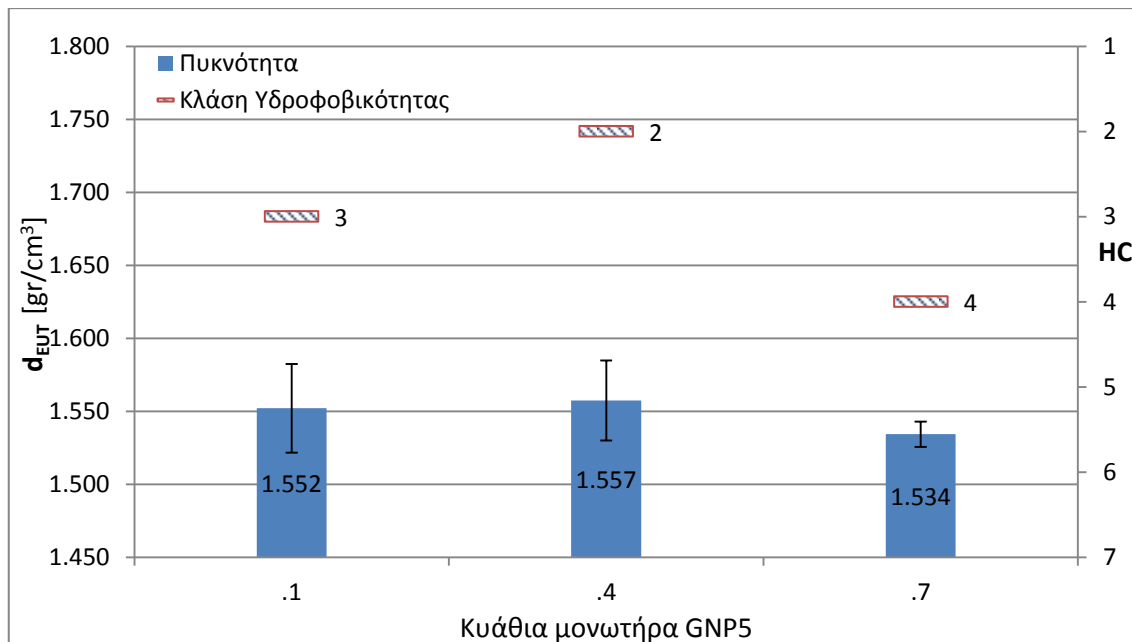


Σχήμα 4.5 Πυκνότητα και κλάση υδροφοβικότητας ανά κιάθιο του μονωτήρα GNP4

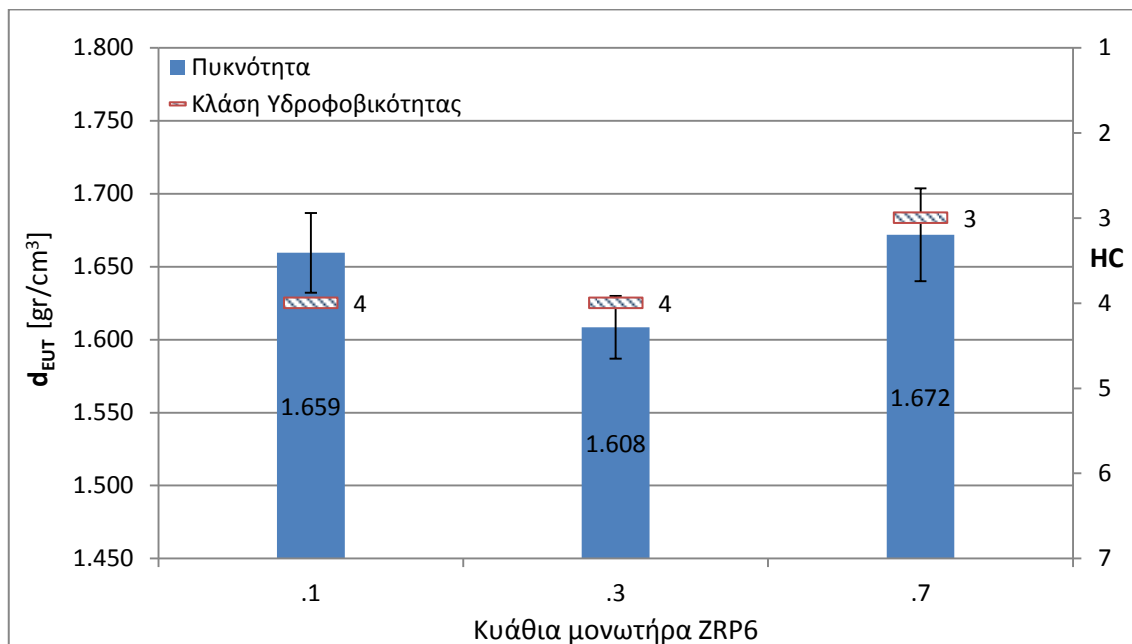
Στους μονωτήρες GNP4 και GNP5 (Σχήμα 4.5 και Σχήμα 4.6 αντίστοιχα) αναφορικά με τις μετρούμενες τιμές πυκνότητας του περιβλήματος σιλικόνης παρατηρούμε ότι για τον μεν πρώτο η μεγαλύτερη τιμή μετράται στο κιάθιο GNP4.7 με $1,565 \text{ gr/cm}^3$ και η μικρότερη στο μεσαίο κιάθιο GNP4.4 με $1,533 \text{ gr/cm}^3$. (η διαφορά μεταξύ του πρώτου με το μεσαίο κιάθιο είναι $0,002 \text{ gr/cm}^3$) για τον δε δεύτερο ισχύει το αντίστροφο. Στο μονωτήρα GNP5 η τιμή πυκνότητας του κιαθίου GNP5.7 είναι $1,534 \text{ gr/cm}^3$, στο GNP5.4 $1,557 \text{ gr/cm}^3$ ενώ κατά $0,005 \text{ gr/cm}^3$ μικρότερη στο πρώτο κιάθιο.

Στο μονωτήρα GNP4 (Σχήμα 4.5) η διασπορά των τιμών γύρω από τη μέση τιμή είναι μεγαλύτερη στο κιάθιο GNP4.7 ενώ για τα υπόλοιπα 2 κιάθια είναι $0,011 \text{ gr/cm}^3$ για το GNP4.1 και $0,037 \text{ gr/cm}^3$ για το GNP4.4. Στον μονωτήρα GNP5 αντίστοιχα υπολογίστηκε τυπική απόκλιση $0,03 \text{ gr/cm}^3$ για το GNP5.1, $0,027 \text{ gr/cm}^3$ για το

GNP5.4 και $0,009 \text{ gr/cm}^3$ για το κιάθιο GNP5.7. Τέλος, τα εξεταζόμενα κιάθια του μονωτήρα GNP4 δείχνουν να έχουν απολέσει τις υδροφοβικές τους ιδιότητες. Κατατάσσονται δε στην (ίδια) κλάση υδροφοβικότητας 4. Για τον GNP5, γήρανση δείχνουν να έχουν υποστεί τα ακραία κιάθια του, ενώ το GNP5.4 ανήκει στην κλάση 2.

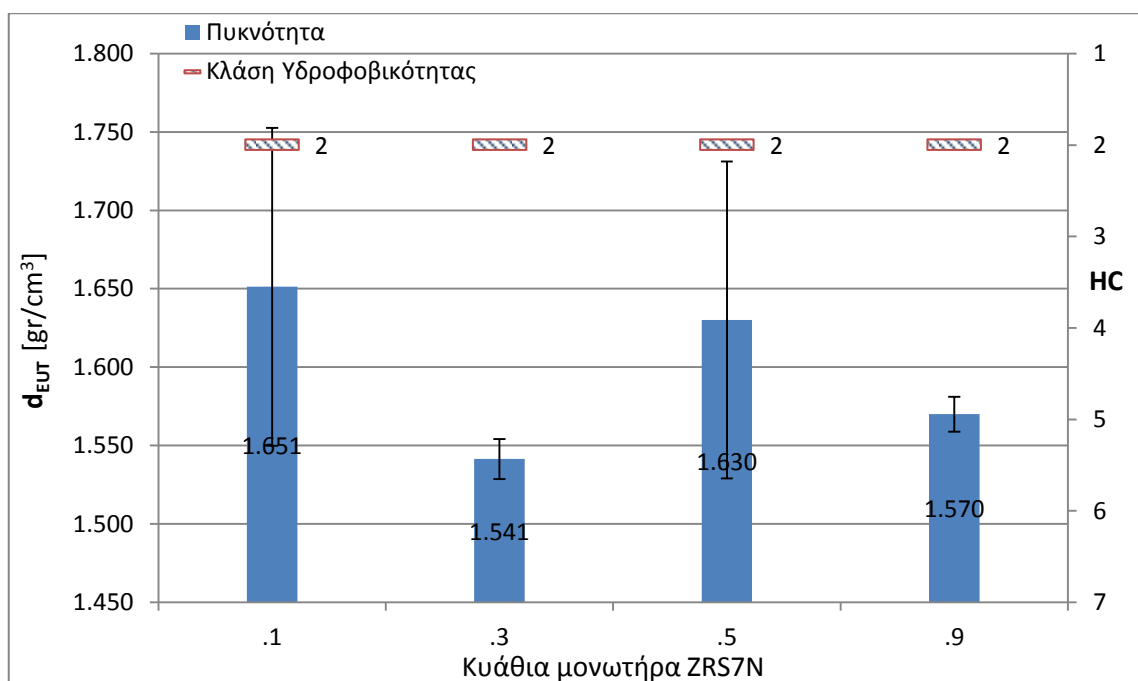


Σχήμα 4.6 Πυκνότητα και κλάση υδροφοβικότητας ανά κιάθιο του μονωτήρα GNP5



Σχήμα 4.7 Πυκνότητα και κλάση υδροφοβικότητας ανά κιάθιο του μονωτήρα ZRP6

Στο ιστόγραμμα του Σχήμα 4.7 αποτυπώνονται οι τιμές πυκνότητας για τον μονωτήρα ZRP6. Η μεγαλύτερη τιμή παρατηρείται στο κυάθιο ZRP6.7 με $1,672 \text{ gr/cm}^3$, ακολουθεί το πρώτο κυάθιο με τιμή πυκνότητας $1,659 \text{ gr/cm}^3$ και το μεσαίο με $1,608$. Αναφορικά με την τυπική απόκλιση των τιμών αυτή κυμαίνεται στο διάστημα $0,027 \text{ gr/cm}^3 \pm 0,005 \text{ gr/cm}^3$. Πιο συγκεκριμένα, μεγαλύτερη διασπορά παρουσιάζουν οι μετρούμενες τιμές του κυαθίου ZRP6.7 με $0,032 \text{ gr/cm}^3$ και ακολουθούν το κυάθιο ZRP6.1 με $0,027 \text{ gr/cm}^3$ και το ZRP6.3 με $0,022 \text{ gr/cm}^3$. Αναφορικά με τις κλάσεις υδροφοβικότητας στα υπό εξέταση κυάθια, στην κλάση 4 ανήκουν τα κυάθια ZRP6.1 και ZRP6.3 ενώ το ZRP6.7 ανήκει στην κλάση 3.



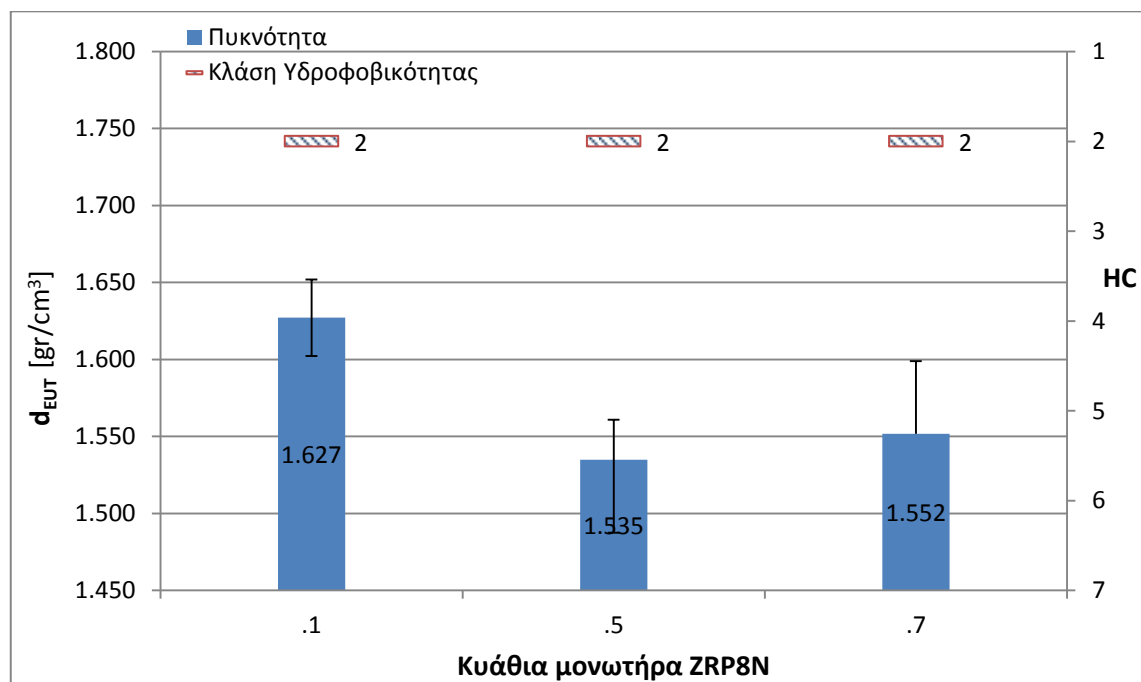
Σχήμα 4.8 Πυκνότητα και κλάση υδροφοβικότητας ανά κυάθιο του μονωτήρα ZRS7N

Στους μονωτήρες ZRS7N (Σχήμα 4.8) και ZRP8N (Σχήμα 4.9) αναφορικά με τις μετρούμενες τιμές πυκνότητας του περιβλήματος σιλικόνης παρατηρούμε τα εξής: για τον ZRS7N η μεγαλύτερη τιμή μετράται στο κυάθιο ZRS7N.1 με $1,651 \text{ gr/cm}^3$ και η μικρότερη στο κυάθιο ZRS7N.3 με $1,541 \text{ gr/cm}^3$. Στο κυάθιο ZRS7N.5 μετρήθηκε πυκνότητα $1,63 \text{ gr/cm}^3$ και στο ακραίο ZRS7N.9 $1,57 \text{ gr/cm}^3$. Στον μονωτήρα ZRP8N η τιμή πυκνότητας του κυαθίου ZRP8N.1 είναι $1,627 \text{ gr/cm}^3$, στο ZRP8N.5 $1,535 \text{ gr/cm}^3$ και $1,552 \text{ gr/cm}^3$ μικρότερη στο τελευταίο κυάθιο ZRP8N.7.

Η διασπορά των τιμών γύρω από τη μέση τιμή στον ZRS7N είναι μεγαλύτερη στα κυάθια ZRS7N.1 και ZRS7N.5, με τιμή $0,101 \text{ gr/cm}^3$ γεγονός το οποίο αποτελεί

ένδειξη δυνητικής ομοιογένειας του υλικού τους. Για τα υπόλοιπα 2 κυάθια είναι 0,011 gr/cm³ για το ZRS7N.9 και 0,0137 gr/cm³ για το ZRS7N.3. Στον μονωτήρα ZRP8N αντίστοιχα υπολογίστηκε τυπική απόκλιση 0,025 gr/cm³ για το ZRP8N.1, 0,026 gr/cm³ για το ZRP8N.5 και 0,047 gr/cm³ για το κυάθιο ZRP8N.7.

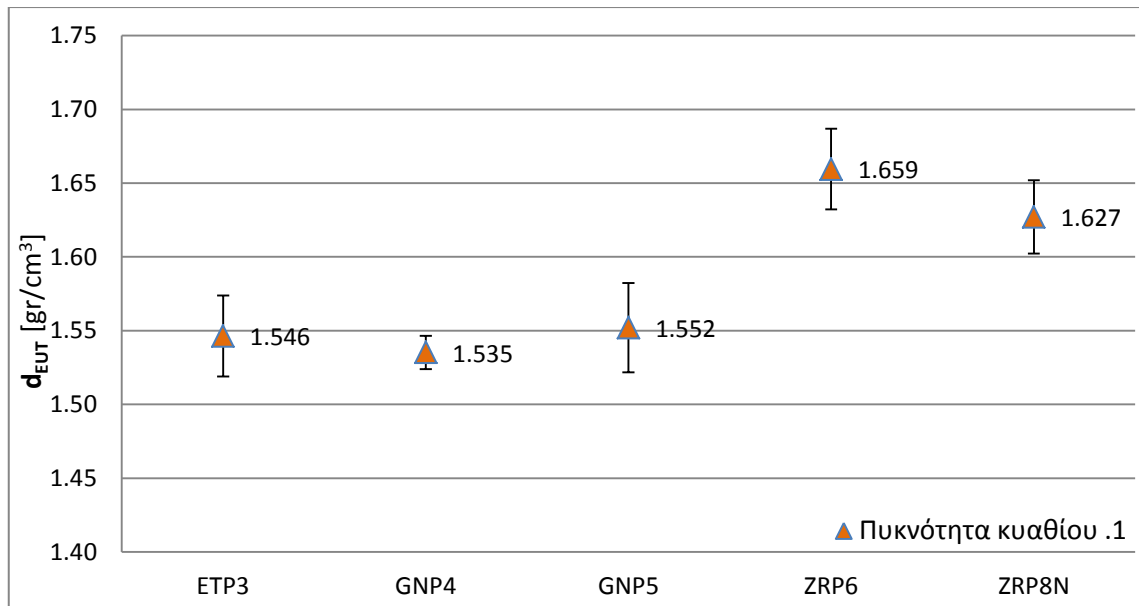
Τέλος, παρατηρούμε ότι παρόλο που οι μονωτήρες ZRS7N και ZRP8N δεν έχουν εγκατασταθεί στο δίκτυο, όλα τα κυάθια τους ανήκουν στην κλάση υδροφοβικότητας 2 (και όχι στην HC1 όπως θα περιμέναμε)



Σχήμα 4.9 Πυκνότητα και κλάση υδροφοβικότητας ανά κυάθιο του μονωτήρα ZRP8N

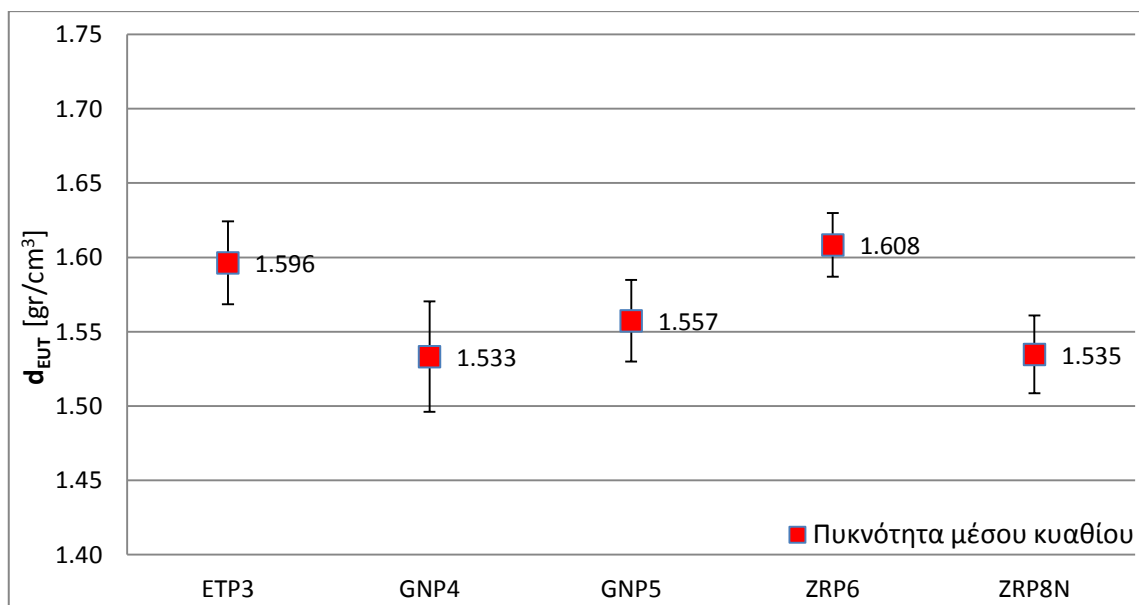
4.3.4.1 Μονωτήρες στήριξης - σύγκριση ανά θέση κυαθίου

Στο παρακάτω Σχήμα 4.10 απεικονίζεται η τιμή πυκνότητας πρώτου κυαθίου (του πλησιέστερου κυαθίου στον ρευματοφόρο αγωγό) των υπό μελέτη μονωτήρων στήριξης. Παρατηρείται ότι οι μετρούμενες τιμές πυκνότητας στους μονωτήρες ETP3, GNP4 και GNP5, οι οποίοι αποξηλώθηκαν μετά από πολυετή λειτουργία στο δίκτυο, είναι μειωμένες. Ο μονωτήρας ZRP6 ήταν σε λειτουργία ενάμιση έτος, ωστόσο μετρήθηκε πυκνότητα 1,659 gr/cm³ (με τυπική απόκλιση 0,027 gr/cm³) στο κυάθιο ZRP6.1, δηλαδή αυξημένη κατά 0,032 gr/cm³ από το πρώτο κυάθιο του μη χρησιμοποιημένου μονωτήρα της ίδιας εταιρείας, ZRP8N.



Σχήμα 4.10 Πυκνότητα κυαθίου .1 (εγγύτερο στον ηλεκτροφόρο αγωγό) ανά μονωτήρα στήριξης

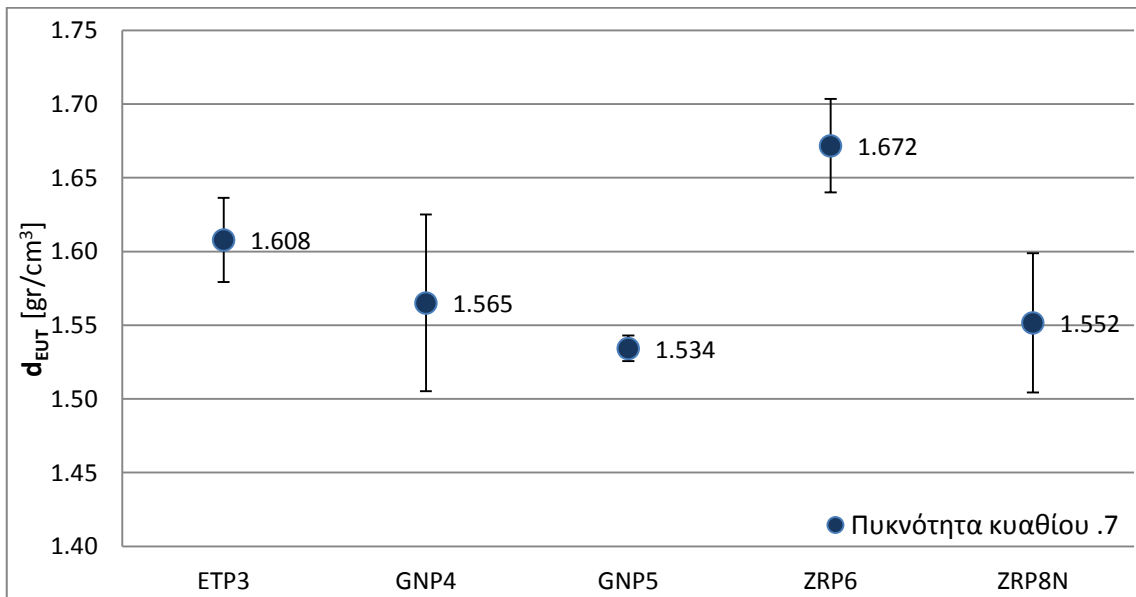
Μεταξύ των μονωτήρων GNP4 και GNP5, οι οποίοι έχουν κατασκευαστεί από την ίδια εταιρεία παρατηρείται μεγαλύτερη τιμή πυκνότητας στο γηραιότερο (ως προς τα έτη λειτουργίας) μονωτήρα κατά $0,017 \text{ gr/cm}^3$. Τα 2 παραπάνω γεγονότα είναι πιθανό να οφείλονται σε διαφοροποίηση της παρασκευής του μείγματος, αλλά και στο σφάλμα το οποίο εισάγεται κατά τη διαδικασία των μετρήσεων.



Σχήμα 4.11 Πυκνότητα μέσου κυαθίου ανά μονωτήρα στήριξης

Το ίδιο περίπου μοτίβο εμφανίζεται στο Σχήμα 4.11 το οποίο οπτικοποιεί τις τιμές πυκνότητας του μέσου κυαθίου για κάθε μονωτήρα στήριξης: η διαφορά πυκνότητας στα μεσαία κυάθια μεταξύ των ZRP6 και ZRP8N προκύπτει $0,073 \text{ gr/cm}^3$ (αυξημένη κατά $0,041 \text{ gr/cm}^3$), ενώ στο κυάθιο GNP5.4 μετράται τιμή πυκνότητας κατά $0,024 \text{ gr/cm}^3$ μεγαλύτερη από το αντίστοιχο (γηραιότερο) μέσο κυάθιο GNP4.4 (πυκνότητα $1,533 \text{ gr/cm}^3$ με τυπική απόκλιση $0,037 \text{ gr/cm}^3$).

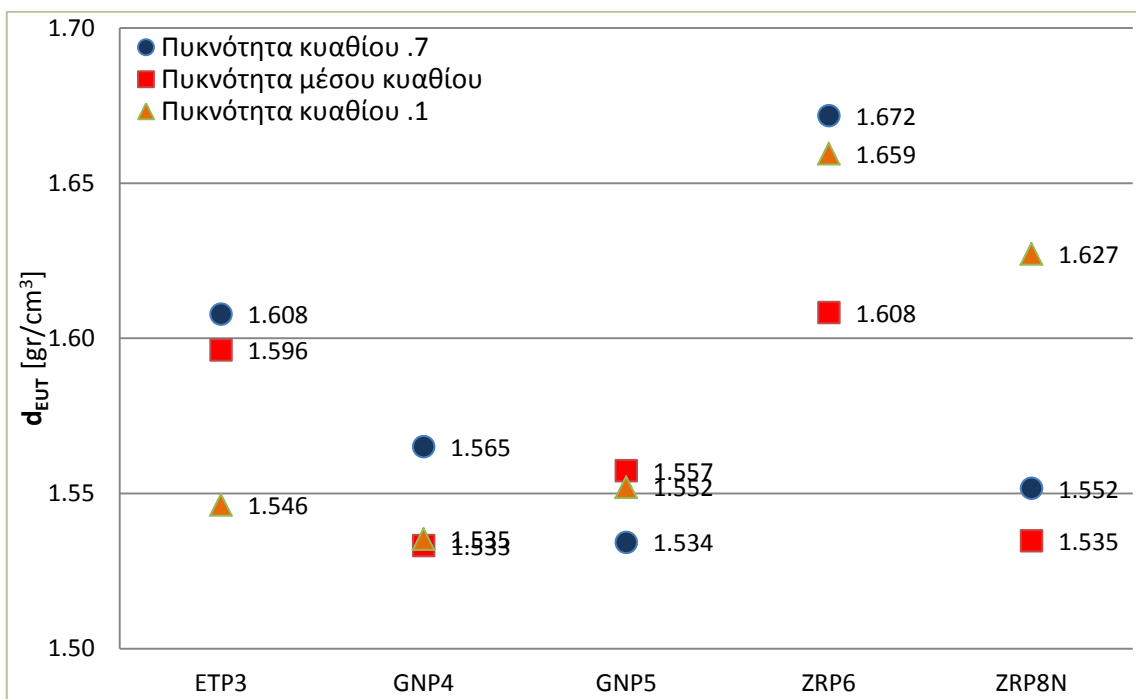
Στο τελευταίο κυάθιο .7 (το εγγύτερο στο βραχίονα στήριξης) για τους μονωτήρες της εταιρείας GN η διαφορά αντιστρέφεται, με την τιμή της πυκνότητας στο κυάθιο GNP4.7 να είναι κατά $0,031 \text{ gr/cm}^3$ μεγαλύτερη από το κυάθιο GNP5.7. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η διασπορά ως προς τη μέση τιμή των τριών τιμών πυκνότητας των μετρούμενων δοκιμών του GNP4.7 υπολογίστηκε $0,06 \text{ gr/cm}^3$. Στο παρακάτω Σχήμα 4.12 καταγράφεται η διαφορά στις τιμές πυκνότητας του κυαθίου .7 μεταξύ των μονωτήρων της εταιρείας ZR στα $0,12 \text{ gr/cm}^3$, με το ZRP6.7 να έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από το ZRP8N.7. Οι τυπικές αποκλίσεις στα δύο αυτά κυάθια υπολογίζονται στα $0,047 \text{ gr/cm}^3$ για το ZRP8N.7 και αντίστοιχα στα $0,032 \text{ gr/cm}^3$ για το κυάθιο ZRP6.7.



Σχήμα 4.12 Πυκνότητα κυαθίου .7 (εγγύτερο στο βραχίονα στήριξης) ανά μονωτήρα στήριξης

Στο Σχήμα 4.13 απεικονίζονται συγκεντρωτικά οι πυκνότητες των μονωτήρων στήριξης ανά θέση κυαθίου. Η μεγαλύτερη τιμή πυκνότητας στους μονωτήρες στήριξης καταγράφεται στο κυάθιο ZRP6.7 ($1,672 \text{ gr/cm}^3$), ενώ η χαμηλότερη στο μέσο κυάθιο του μονωτήρα GNP4 ($1,533 \text{ gr/cm}^3$).

Στον μονωτήρα ETP3 είναι εμφανές ότι το πρώτο κυάθιο έχει τη χαμηλότερη τιμή πυκνότητας και το ETP3.7 τη υψηλότερη. Το εύρος μέσα στο οποίο κυμαίνονται οι μετρούμενες τιμές ανά κυάθιο στον εν λόγω μονωτήρα είναι της τάξης των 0,062 gr/cm^3 . Το αντίστοιχο εύρος για τους μονωτήρες της εταιρείας GN διαμορφώνεται από τις τιμές πυκνότητας του GNP4.7 (μέγιστη τιμή 1,565 gr/cm^3) και του μέσου κυαθίου (ελάχιστη τιμή 1,533 gr/cm^3) στα 0,032 gr/cm^3 . Στον ίδιο μονωτήρα, στο κυάθιο GNP4.1 παρατηρείται εξίσου χαμηλή τιμή πυκνότητας με το μέσο κυάθιο. Γενικά φαίνεται ότι στους 3 από τους 4 αποξηλωμένους μονωτήρες στήριξης, το εγγύτερα στη γείωση κυάθιο έχει τη μεγαλύτερη πυκνότητα συγκριτικά με τα υπόλοιπα.

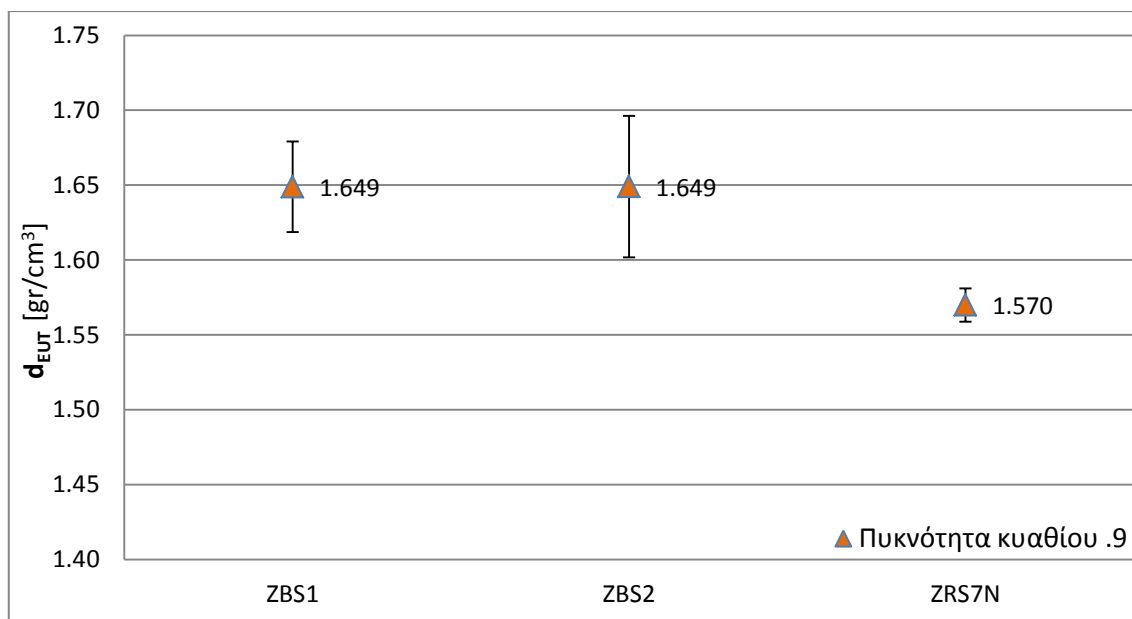


Σχήμα 4.13 Πυκνότητα κυαθίων ανά μονωτήρα στήριξης

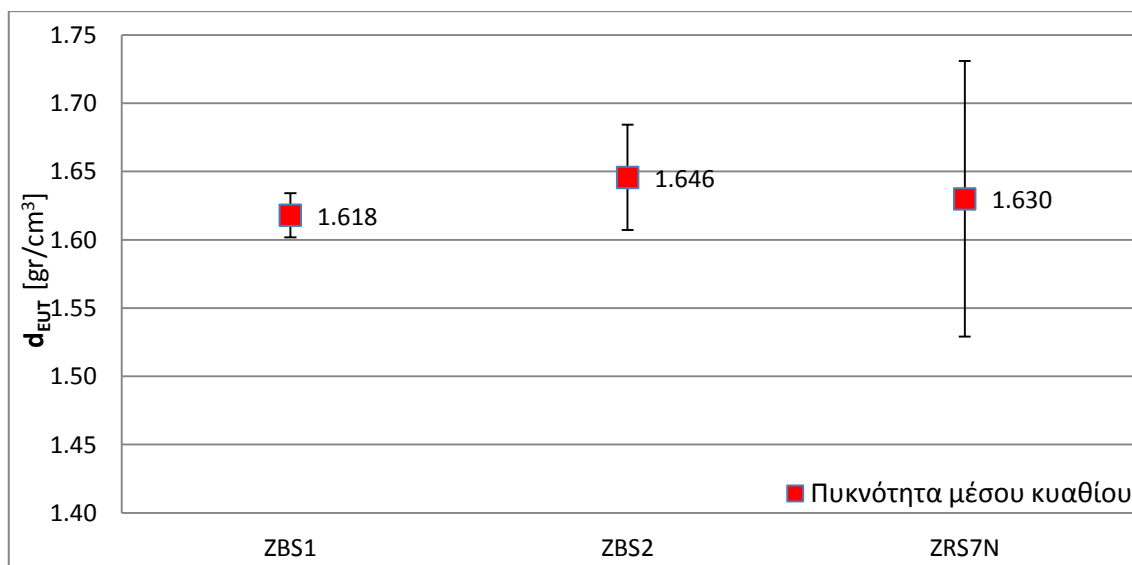
Στον μονωτήρα GNP5 δε, όπου δεν ισχύει το παραπάνω, βλέπουμε ότι οι τιμές πυκνότητας κυμαίνονται στο μικρότερο εύρος ανάμεσα στους μονωτήρες στήριξης με τη μεγαλύτερη να απέχει από την ελάχιστη μετρούμενη μόλις 0,023 gr/cm^3 . Αντίθετα, στο κυάθιο το οποίο βρίσκεται εγγύτερα στον ηλεκτροφόρο αγωγό, οι αντίστοιχες πυκνότητες μετρήθηκαν σε χαμηλότερα επίπεδα, με μόνη εξαίρεση το ZRP8N.1 του αντίστοιχου μη χρησιμοποιημένου μονωτήρα.

4.3.4.2 Μονωτήρες ανάρτησης - σύγκριση ανά θέση κυαθίου

Στο Σχήμα 4.17 απεικονίζονται οι τιμές πυκνότητας των κυαθίων των μονωτήρων ανάρτησης οι οποίοι εξετάστηκαν. Στους δύο μονωτήρες της εταιρείας ZB παρατηρείται ίδια τιμή πυκνότητας στο εγγύτερο στον ηλεκτροφόρο αγωγό κυάθιο. Οι πυκνότητες των υπολοίπων κυαθίων διαφοροποιούνται σημαντικά αφού στον ZBS1 η διασπορά των τιμών γύρω από τη μέση τιμή πυκνότητας του μονωτήρα υπολογίζεται στα $0,047 \text{ gr/cm}^3$ ενώ αντίστοιχα στον ZBS2 στα $0,003 \text{ gr/cm}^3$.

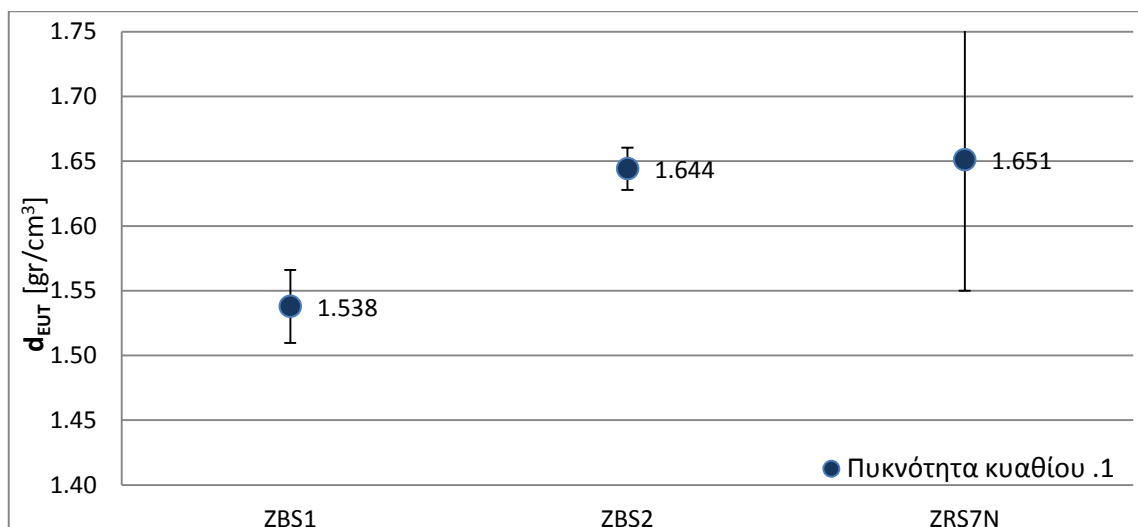


Σχήμα 4.14 Πυκνότητα κυαθίου .9 (εγγύτερο στον αγωγό) ανά μονωτήρα ανάρτησης

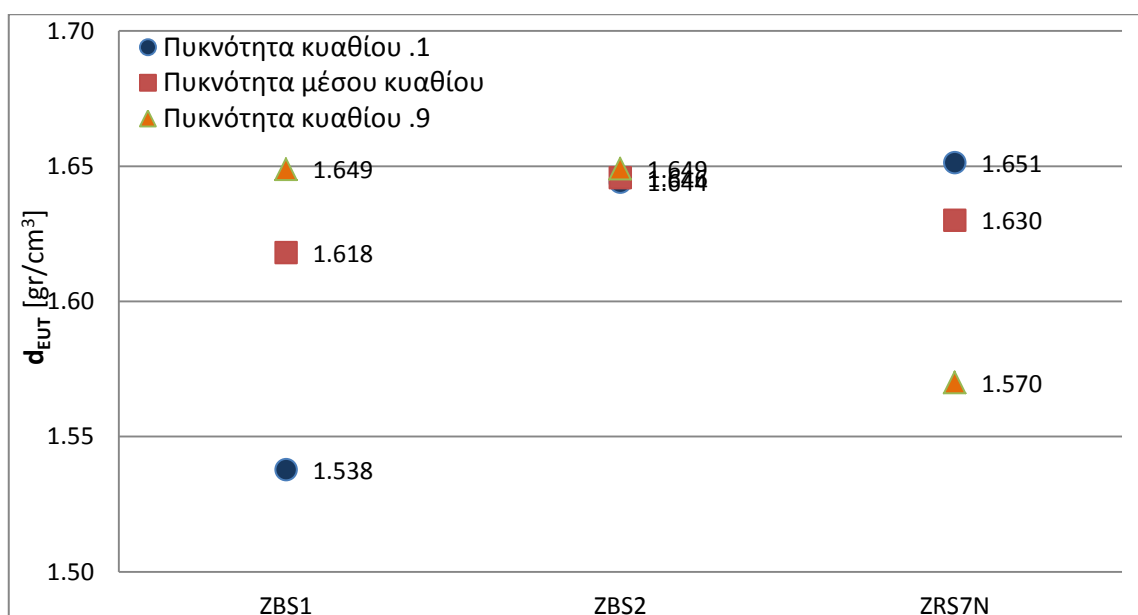


Σχήμα 4.15 Πυκνότητα μέσου κυαθίου ανά μονωτήρα ανάρτησης

Πιο αναλυτικά, η πυκνότητα του μέσου κυαθίου στον μονωτήρα ZBS2 υπολογίστηκε στα $1,646 \text{ gr/cm}^3$ δηλαδή $0,028 \text{ gr/cm}^3$ μεγαλύτερη από την πυκνότητα του αντίστοιχου κυαθίου του ZBS1. Μεγαλύτερη διαφορά καταγράφηκε στο πρώτο κυάθιο. Η τιμή της πυκνότητας του ZBS1.1 μετρήθηκε κατά $0,106 \text{ gr/cm}^3$ μικρότερη από την τιμή του κυαθίου ZBS2.1. Οι μετρούμενες τιμές πυκνότητας μονωτήρα ανάρτησης ZRS7N της εταιρείας ZR πλησιάζουν τις τιμές του ZRP6 (βλ. Σχήμα 4.7). Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να συνυπολογιστεί το γεγονός ότι στο μέσο και στο πρώτο κυάθιο (ZRS7N.5 και ZRS7N.1) του μονωτήρα η τυπική απόκλιση φτάνει στα $0,101 \text{ gr/cm}^3$ όπως φαίνεται και στις γραφικές παραστάσεις στο Σχήμα 4.15 και στο Σχήμα 4.16 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.16 Πυκνότητα κυαθίου .1 (εγγύτερο στο βραχίονα) ανά μονωτήρα ανάρτησης



Σχήμα 4.17 Πυκνότητα κυαθίου ανά μονωτήρα ανάρτησης

4.4 Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή εξετάστηκαν πέντε συνθετικοί μονωτήρες στήριξης και τρεις συνθετικοί μονωτήρες ανάρτησης (βλ. Πίνακας 4.12). Το περίβλημα των μονωτήρων ήταν κατασκευασμένο από HTV SiR. Από το σύνολο των μονωτήρων οι 6 ήταν σε λειτουργία στο Ελληνικό δίκτυο μέσης τάσης (με διαφορετικό χρόνο λειτουργίας κάθε μονωτήρας) σε συνθήκες υπαίθρου, ενώ οι υπόλοιποι δύο δεν είχαν εγκατασταθεί και λειτουργήσει. 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 οπτική επιθεώρηση, δοκιμή σωστής συγκόλλησης, δοκιμή υδροφοβικότητας και μέτρηση πυκνότητας για να αξιολογηθεί η κατάσταση του ελαστομερούς περιβλήματός τους.

Κωδική Ονομασία	Τύπος	Έτη Λειτουργίας
ZBS1	ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ	8
ZBS2	ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ	9
ETP3	ΣΤΗΡΙΞΗΣ	6
GNP4	ΣΤΗΡΙΞΗΣ	5
GNP5	ΣΤΗΡΙΞΗΣ	3
ZRP6	ΣΤΗΡΙΞΗΣ	1,5
ZRS7N	ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ	0
ZRP8N	ΣΤΗΡΙΞΗΣ	0

Πίνακας 4.12 Στοιχεία των υπό μελέτη συνθετικών μονωτήρων

Οι (αποξηλωμένοι) μονωτήρες δεν παρουσιάζουν σημαντικές, οπτικώς ανιχνεύσιμες αλλοιώσεις, συγκρίσιμες με τις αναφερόμενες στις τεχνικές οδηγίες [87] [88], οι οποίες να αποτελούν αιτία άμεσης αντικατάστασής τους. Στο ελαστομερές περίβλημα των μονωτήρων δεν υπάρχουν ίχνη από αγωγίμες οδεύσεις άνθρακα ή δεντρίτες, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι δεν έχει αναπτυχθεί επιφανειακή δραστηριότητα και σημαντική διάβρωση του περιβλήματος. Για το γεγονός αυτό δεν μπορούμε να εκτιμήσουμε ασφαλώς σε τι ποσοστό οφείλεται στους βραχίονες έδρασης των μονωτήρων αφού δεν υπάρχουν πληροφορίες για το υλικό κατασκευής τους (μεταλλικοί με γείωση, ξύλινοι, κτλ)

Ωστόσο, εντοπίστηκαν και καταγράφηκαν συγκεκριμένες φθορές οι οποίες συνοψίζονται παρακάτω:

- στο πολυμερικό περίβλημα του μονωτήρα ZBS1 παρατηρούνται μορφολογικές αλλοιώσεις (τομές και εκδορές) στη μια πλευρά, οι οποίες προκλήθηκαν πιθανόν από πτηνά. Η οριζόντια θέση (ως επί το πλείστον) στην οποία τοποθετούνται οι μονωτήρες ανάρτησης στο δίκτυο διευκολύνει την επικάθιση πτηνών στο περίβλημά τους, με αποτέλεσμα αυτά να δημιουργούν φθορές από ράμφη ή νύχια.
- Στα πρώτα κυάθια των μονωτήρων ZBS1 (βλ. Εικόνα 4.8 φωτογρ. δ) και ZBS2 (βλ. Εικόνα 4.12 φωτογρ. γ) παρατηρήθηκαν ρηγματώσεις στο σημείο εφαρμογής των κυαθίων στον πυρήνα. Οι ρωγμές είναι ένδειξη γήρανσης του ελαστομερούς υλικού. Λόγω του σημείου που εμφανίστηκαν αποτελούν σοβαρή φθορά για το μονωτήρα αφού μπορούν να προκαλέσουν εισροή νερού στον πυρήνα του με καταστροφικές συνέπειες.
- Στους μονωτήρες GNP4 και GNP5 (βλ. Εικόνα 4.21 και Εικόνα 4.25 αντίστοιχα), οι οποίοι ανήκουν στον ίδιο κατασκευαστή, εντοπίστηκαν κενά στη δεξιά πλευρά του ελαστομερούς περιβλήματός τους. Τα κενά αποτελούν κατασκευαστική ατέλεια και οφείλονται είτε στον εγκλωβισμό φυσαλίδων αέρα στο μείγμα κατά τη χύτευση, είτε σε μη επαρκή σύσφιξη του εκμαγείου τις πρέσας χύτευσης τις περιβλήματος [65]. Οι τιμές πυκνότητας στα κυάθια των δύο αυτών μονωτήρων μετρήθηκαν σχεδόν στα ίδια επίπεδα αναλογικά με τις υπόλοιπους μονωτήρες.
- Κατά τις δοκιμές σωστής συγκόλλησης το περίβλημα βρέθηκε μη ορθά αρμοσμένο στον πυρήνα του μονωτήρα ETP3 και τους ακροδέκτες του μονωτήρα GNP4.

Κατά τις δοκιμές υδροφοβικότητας μέσω διαβροχής, καταγράφηκαν μειωμένες υδροφοβικές ιδιότητες στους αποξηλωμένους μονωτήρες, ως αποτέλεσμα γήρανσης του περιβλήματος τους. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι το SiR διατηρεί τις ιδιότητες μεταφοράς της υδροφοβικότητας σε πολύ καλό επίπεδο.

- Στα μεγάλης διαμέτρου κυάθια των μονωτήρων καταγράφεται μείωση των υδροφοβικών ιδιοτήτων, συγκριτικά με τα αντίστοιχα μικρής διαμέτρου,

γεγονός αναμενόμενο αφού τα δεύτερα προστατεύονται (περισσότερο) από την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, κάτω από τα πρώτα.

- Καταγράφηκε μειωμένη υδροφοβικότητα στην περιφέρεια πολλών κυαθίων (βλ. μονωτήρα ETP3 στην Εικόνα 4.19 φωτογρ. β, μονωτήρα GNP4 στην Εικόνα 4.23 και GNP5 στην Εικόνα 4.26) και κυρίως στην αιχμή της περιφέρειάς τους, γεγονός που οφείλεται στη μεγαλύτερη έκθεσή της στην υπεριώδη ακτινοβολία, εν συγκρίσει με τα σημεία που βρίσκονται κοντά στον πυρήνα του μονωτήρα.
- Η απώλεια της υδροφοβικότητας που καταγράφεται και ο αποχρωματισμός που παρατηρείται σε περιοχές των κυαθίων της ίδιας πλευράς (βλ. τον μονωτήρα ZBS1 στην Εικόνα 4.11 και τον ZRP6 στην Εικόνα 4.30) αποδίδεται στη γωνία πρόσπτωσης τις υπεριώδους ακτινοβολίας στο περίβλημα. Κατά συνέπεια, η θέση που είχαν οι μονωτήρες στο δίκτυο, αλλά και ως τις τα σημεία του ορίζοντα, αποτελεί παράγοντα ομοιογένειας τις γήρανσής τους.
- Οι μονωτήρες ZRS7N και ZRP8N οι οποίοι δεν έχουν τεθεί σε λειτουργία, ούτε έχουν εκτεθεί σε καιρικά φαινόμενα, αναμενόταν να καταταγούν στην κλάση υδροφοβικότητας 1. Ωστόσο, κατόπιν δοκιμής βάσει του προτύπου, βρέθηκε ότι ανήκουν στην κλάση 2. Επιπλέον, στο μονωτήρα ZRP6, ο οποίος ανήκει στον ίδιο κατασκευαστή με τις προαναφερθέντες και μετράει μόλις 1,5 έτος λειτουργίας στο δίκτυο, μετρήθηκαν αρκετά μειωμένες υδροφοβικές ιδιότητες (ενδεικτικά αναφέρεται ότι το πρώτο και το μέσο κυάθιό του ανήκουν στην κλάση 4).

Στη διαδικασία μέτρησης της πυκνότητας των κυαθίων του πολυμερικού περιβλήματος των μονωτήρων, οι τιμές πυκνότητας των δοκιμίων μετρήθηκαν $\geq 1,5 \text{ gr/cm}^3$. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένδειξη ότι το συνθετικό περίβλημα των μονωτήρων που εξετάστηκαν είναι ελαστομερές σιλικόνης με προσθήκη ένυδρης αλουμίνιας ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), κατασκευασμένο με τη μέθοδο του βουλκανισμού σε υψηλή θερμοκρασία (HTV) [8]. Αξίζει να αναφερθεί ότι η τεχνική περιγραφή τις ΔΕΗ [77] δεν αναφέρεται στο είδος και στην ποσότητα των πρόσθετων ενισχυτικών υλικών (fillers) τα οποία θα πρέπει να περιέχει το ελαστομερές προς βελτίωση των μηχανικών του ιδιοτήτων.

Συμπερασματικά, παρατηρείται ότι οι διαφοροποιήσεις στις μετρούμενες τιμές πυκνότητας τις περισσότερες των περιπτώσεων ήταν της τάξης του εκατοστού του γραμμαρίου ανά κυβικό εκατοστό. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στα λίγα έτη

λειτουργίας και έκθεσης των μονωτήρων στο δίκτυο (μέγιστο 9 έτη [ZBS2]) αλλά κυρίως στο γεγονός ότι στους μονωτήρες δεν υπήρχε επιφανειακή δραστηριότητα (εκκενώσεις ξηράς ζώνης, κτλ.) κατά τη λειτουργία τους.

Το εύρος της τυπικής απόκλισης των τιμών πυκνότητας ανά μονωτήρα, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.13 είναι της τάξης των 25 ± 5 εκατοστών του γραμμαρίου ανά κυβικό εκατοστό (στους περισσότερους μονωτήρες), ή και μικρότερο. Επιπροσθέτως η μέση τιμή της πυκνότητας των κυαθίων ανά μονωτήρα διαφέρει μεταξύ κατασκευαστών. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στο ότι κάθε κατασκευαστής συνθετικών μονωτήρων διαμορφώνει τις δικές του αναλογίες συστατικών του μείγματος πολυμερούς (blend) διατηρώντας μια ισορροπία ανάμεσα στην επιτυχή περάτωση των δοκιμών που θέτει η προδιαγραφή [77] και στο οικονομικό σκέλος κατασκευής του προϊόντος.

Μονωτήρας	Κυάθιο	d_{EUT} [gr/cm ³]	$\sigma_{ολ}$ [gr/cm ³]
ZBS1	.1	1,538	0,028
	.2	1,594	0,005
	.4	1,618	0,016
	.9	1,649	0,03
ZBS2	.1	1,644	0,016
	.3	1,651	0,043
	.5	1,646	0,039
	.9	1,649	0,047
ETP3	.1	1,546	0,027
	.3	1,596	0,028
	.7	1,608	0,029
GNP4	.1	1,535	0,011
	.4	1,533	0,037
	.7	1,565	0,06
GNP5	.1	1,552	0,03
	.4	1,557	0,027
	.7	1,534	0,009
ZRP6	.1	1,659	0,027
	.3	1,608	0,022
	.7	1,672	0,032
ZRS7N	.1	1,651	0,101
	.3	1,541	0,013
	.5	1,63	0,101
	.9	1,57	0,011
ZRP8N	.1	1,627	0,025
	.5	1,535	0,026
	.7	1,552	0,047

Πίνακας 4.13 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεων και τυπική απόκλιση τιμών πυκνότητας

Κατά συνέπεια, θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν ότι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την πυκνότητα του τελικού ελαστομερούς, όπως ο τρόπος παρασκευής του μείγματος, οι διαφορετικές αναλογίες συστατικών και ενισχυτικών πρόσθετων, οι ποσότητες και τα είδη ομογενοποιητών που ενδεχομένως χρησιμοποιούνται από την κάθε εταιρεία κατασκευής ελαστομερών αλλά και το ποσοστό ομογενοποίησης του μείγματος, διαφοροποιούνται μεταξύ των κατασκευαστών.

Πέρα από τα παραπάνω, παρατηρούνται τα εξής:

- Στους τρεις από τους τέσσερις αποξηλωμένους μονωτήρες στήριξης (ETP3, GNP4 και GNP5) μετρήθηκε μειωμένη τιμή πυκνότητας του κυαθίου που βρίσκεται εγγύτερα στον ηλεκτροφόρο αγωγό (δηλαδή στις περιοχές του μονωτήρα όπου το ηλεκτρικό πεδίο είναι ενισχυμένο). Οι μονωτήρες αυτοί είχαν τα περισσότερα έτη λειτουργίας. Το εύρος των διαφορών της πυκνότητας του κάθε κυαθίου .1 από τα υπόλοιπα κυάθια του ίδιου μονωτήρα κυμαίνονταν από 0,005 gr/cm³ έως 0,06 gr/cm³.
- Στους μονωτήρες ZBS1 και ZBS2, οι οποίοι ανήκουν στον ίδιο κατασκευαστή και έχουν ίδιο έτος κατασκευής, παρατηρήθηκε ίδια τιμή πυκνότητας στα τελευταία (.9) κυάθιά τους, τα οποία βρίσκονται εγγύτερα στον ηλεκτροφόρο αγωγό.
- Η υψηλότερη διασπορά των τιμών πυκνότητας γύρω από τη μέση τιμή, όπως φαίνεται στον παραπάνω Πίνακα 4.13, καταγράφηκε στους δύο νέους μονωτήρες ZRS7N και ZRP8N.
- Αντίστοιχα, στον μονωτήρα ανάρτησης ZBS2, του οποίου οι υδροφοβικές ιδιότητες έχουν μειωθεί κατά πολύ (ανήκει στην υψηλότερη κλάση [HC5] εν συγκρίσει με τους υπόλοιπους μονωτήρες) παρατηρήθηκε η μικρότερη τυπική απόκλιση (βλ. Πίνακα 4.13) αναφορικά με τις μετρούμενες τιμές πυκνότητας στα κυάθιά του. Ο ZBS2 έχει τα περισσότερα έτη λειτουργίας στο δίκτυο μέσης τάσης.

Γενικά, δεν παρατηρείται άμεση συσχέτιση της τιμής πυκνότητας (στο βαθμό που αυτή διαφοροποιείται στις μετρήσεις της παρούσας εργασίας) με τις κλάσεις υδροφοβικότητας στις οποίες κατατάσσονται τα υπό μελέτη κυάθια.

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.3.3, οι μάζες m_4 (μάζα ογκομετρικού σωλήνα μαζί με τη μάζα του νερού με όγκο 60cm³) και m_3 (μάζα ογκομετρικού σωλήνα μαζί με

τη μάζα του νερού με όγκο 60cm^3 και τη μάζα του δοκιμίου) μετρούνταν για την εύρεση της πυκνότητας κάθε δοκιμίου σύμφωνα με το πρότυπο [69]. Με την παραδοχή ότι ο ζυγός ακριβείας επιφέρει αμελητέο ποσοστό σφάλματος στο αποτέλεσμα κάθε μέτρησης, ο κυριότερος παράγοντας εισαγωγής σφάλματος κατά τη διαδικασία μέτρησης πυκνότητας είναι η μέτρηση του όγκου του περιεχομένου του δοχείου:

- Η τριχοειδής ανύψωση στη διεπαφή νερού – γυαλιού δίνει λανθασμένη ένδειξη όγκου στον ογκομετρικό σωλήνα. Το γεγονός ότι η ένδειξη του όγκου λαμβάνονταν βάσει των κοίλων (κέντρο) της επιφάνειας του νερού, μειώνει μεν, αλλά δεν μηδενίζει το σφάλμα.
- Το παραπάνω φαινόμενο, σε συνδυασμό με τον προσδιορισμό του όγκου νερού και νερού - δοκιμίου βάσει τυχαίας γωνίας παρατήρησης της επιφάνειάς του, επιφέρει πρόσθετο σφάλμα σε κάθε μέτρηση.
- Οι φυσαλίδες αέρα που προσκολλούνταν στις επιφάνειες των κομματιών του δοκιμίου κατά τον εμβαπτισμό του σε νερό – παρόλο που στο μεγαλύτερο ποσοστό τους απομακρύνονταν – συνέβαλλαν στην εισαγωγή σφάλματος ανά μέτρηση.
- Τέλος, λόγω του εξοπλισμού εισαγωγής νερού στο σωλήνα (σύριγγα) η ελάχιστη μάζα (της σταγόνας) του νερού που προστίθετο για να συμπληρωθεί κάθε φορά ο όγκος των 60cm^3 , ήταν περίπου $0,015\text{ gr}$. Το γεγονός αυτό επιφέρει σφάλμα σε κάθε μέτρηση περίπου ± 15 εκατοστά του γραμμαρίου.

Βιβλιογραφία

- [1] Looms, J.S., *Insulators for High Voltages*, Peregrinus, 1988.
- [2] 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.
- [3] Ι.Α. Σταθόπουλος, *Υψηλές Τάσεις Ι*, Αθήνα: Συμεών.
- [4] National Insulators Association, «National Insulators Association,» 1973. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.nia.org/>.
- [5] McDougald, John & Carol, *A history and guide to North American Glass Pintype Insulators*, National Insulator Association, 1990.
- [6] Κ.Θ. Δέρβος, *Μονωτικά υλικά υψηλών τάσεων*, Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2011.
- [7] V.T. Kontargyri, L.N. Plati, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, «Measurement and simulation of the voltage distribution and the electric field on a glass insulator string,» *Science Direct*, p. pp. 471–480, 10 July 2007.
- [8] K.O.Papailiou, F.Schmuck, *Silicome composite insulators*, Springer, 2013.
- [9] G. & Ed.L.L.Grigsby, «Transmission system,» σε *The electric power engineering handbook*, CRC Press LLC, 2001, p. 104.
- [10] Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Τόμεας Ηλεκτρικής Ισχύος, ΣΗΜΜΥ ΕΜΠ, Συμπληρωματικές Σημειώσεις για το Μάθημα "Παραγωγή Υψηλών Τάσεων", Αθήνα: ΕΜΠ, 2008.
- [11] H. Yangdong, «H. Yangdong Porcelain insulators & electricco.,LTD.,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.yddc.com/>. [Πρόσβαση 08 November 2020].
- [12] Στ. Παπαϊωάννου, *Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας με εναέρια δίκτυα*, Αθήνα: Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού/ Διεύθυνση Εκπαίδευσης, 2010.
- [13] Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, *Τεχνική προδιαγραφή ΔΕΗ GR-47P / 14.10.81 για μονωτήρες 20kV τύπου κώδωνα*, Αθήνα: Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, 1981.
- [14] F. & G.N.Trinh, *High voltage engineering*, CRC Press Taylor & Francis Group, 2014.

- [15] W.D.Callister, D.G.Rethwisch, Materials science and engineering, An introduction 8th edition, John Wilwy & Sons, 2010.
- [16] NGK INSULATORS, LTD., «NGK insulators, LTD.» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ngk-insulators.com/en/info/division/electric/>. [Πρόσβαση 28 October 2020].
- [17] VERESCENCE Group, «LA GRANJA INSULATORS,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.verescenceinsulators.com>. [Πρόσβαση 28 October 2020].
- [18] Powerline magazine, «Powerline,» January 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://powerline.net.in/2016/01/26/insulator-materials/>. [Πρόσβαση 1 November 2020].
- [19] R.Chakraborty, Studies on Silicone Rubber Insulators used for High Voltage Transmission, Bangalore, India: Indian Institute of Science, 2017.
- [20] Pfisterer, «www.pfisterer.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: www.pfisterer.com. [Πρόσβαση 22 November 2020].
- [21] «Wikipedia, EPDM Rubber,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/EPDM_rubber. [Πρόσβαση 1 November 2020].
- [22] Ortiz, N. Catalina Restrepo-Zapata & J. P. Hernandez, «Methodology for generation of time-temperature transformation (TTT) diagram: solid and cellular EPDM,» 2013.
- [23] Cigre Working Group, «Fingerprinting of polymeric insulating materials for outdoor use,» *Cigre Working Group D1.27*, αρ. 595, 2014.
- [24] Rahul Chakraborty, «Studies on Silicone Rubber Insulators used for High Voltage Transmission,» Department of Electrical Engineering Indian Institute of Science, Bangalore, 2017.
- [25] Pfisterer, «Technical facts Silcosil silicone insulators,» Pfisterer, Lucerne, 2018.
- [26] Αθ. Η. Πάνου, «Παρασκευή χαρακτηρισμός και μελέτη ελαστομερών πολυμερικών συστημάτων ελεγχόμενης αποδέσμευσης φαρμάκων,» σε *Διδακτορική Διατριβή - Σχολή Χημικών Μηχανικών*, Αθήνα, Εθνικο Μετσόβειο Πολυτεχνείο, 2014.
- [27] M K Bhagyashree, K.L. Shivabasappa, S. Raavichandran and Shravan Kumar, «Study of HTV Silicone Rubber with Different Concentrations of Filler ATH,»

- International Journal on Emerging Technologies (Special Issue on NCRIET-2015)*, pp. 72-78, 2015.
- [28] P. M. Visakh, Sabu Thomas, Arup K. Chandra, Aji. P. Mathew, *Advances in Elastomers I - Blends and Interpenetrating Networks*, Springer, 2013.
- [29] H. Khan, M. Amin, A. Ahmad, «Characteristics of silicone composites for high voltage insulations,» Topi, Pakistan, 2018.
- [30] Κ.Σιδεράκης, Διερεύνηση της συμπεριφοράς μονωτήρων πορσελάνης και υλικών RTV SIR σε πραγματικές και εργαστηριακές συνθήκες με μετρήσεις του ρεύματος διαρροής, Ηράκλειο: Πανεπιστήμιο Πατρών, 2006.
- [31] R.H.Farzad, A.Hassan, M.A.M.Piah, M.Jawaid, «Electrical and Flammability Properties of AluminaTrihydrate Filled Polypropylene/Ethylene PropyleneDiene Monomer Composites as Insulators in CableApplications,» Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com), 2013.
- [32] D. Liua, L. Songb, H. Songa, J. Chena, Q. Tianb, L. Chena, L. Suna, A. Lu, «Correlation between mechanical properties and microscopic structures of an optimized silica fraction in silicone rubber,» *Composites Science and Technology*, αρ. 165, pp. 373-379, 2018.
- [33] E. A. Cherney, «50 years in the development of polymer suspension-type insulators,» *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 29, pp. pp. 557-585, 1999.
- [34] S.Kumagai, N.Yoshimura, «Polydimethylsiloxan and Alumina Trihydrate System subjected to dry band discharges or high temperature, Part II: Electrical Insulation.,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. pp. 701-707, 2004.
- [35] Κάλλιπος, «Περιοδικού Συστήματος (Οικογένεια βορίου),» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/806/1/3>. Ομάδα 13 (IIIΑ) του Περιοδικού Συστήματος.pdf.
- [36] Xiong-Wei Zhao, Chong-Guang Zang, Ya-Lun Sun, Yu-Long Zhang, Yu-Quan Wen, Qing-Jie Jiao, «Effect of hybrid hollow microspheres on thermal insulation performance and mechanical properties of silicone rubber composites,» *Journal of applied polymer science*, p. 9, 2018.
- [37] J. Song, Z. Huang, Y. Qin and X. Li, «Thermal Decomposition and Ceramifying

- Process of Ceramifiable Silicone Rubber Composite with Hydrated Zinc Borate,» *Materials*, p. 15, 15 May 2019.
- [38] Ο.Κοκκινάκη, Α.Κλίνη, Δ.Πυλαρινός, Ε.Θαλασσινάκης, Ν.Μαυρικάκης, Κ.Σιδεράκης, Ε.Κουδουμας, Δ.Άγγλος, Κ.Καλπούζος, «ΜΚΕ για την διερεύνηση της συμπεριφοράς συνθετικών πολυμερικών ΗΤV SIR μονωτήρων εφαρμογές υπαίθριων εγκαταστάσεων Υψηλής Τάσης με χρήση της τεχνικής LIBS,» *8ο Εθνικό Συνέδριο ΜΚΕ της Ελληνικής Εταιρείας Μη Καταστροφικών Ελέγχων*, p. 16, 8-9 Μάιος 2015.
- [39] I. Fofana, J. Sylvestre N'cho, A. Betie, E. Hounton, F. Meghnefi, K. M. L. Yapi, «Lessons to Learn from Post-Installation Pollution Levels Assessment of Some Distribution Insulators,» *Energies MDPI*, p. 11, 6 August 2020.
- [40] Ν.Χ.Μαυρικάκης, Διερεύνηση των μηχανισμών γήρανσης υπαίθριων συνθετικών μονωτήρων, Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2019.
- [41] Nopporn Chaipanit, Chaiwat RattanaKhongive and Raji Sundararajan, «Acceleratedmultistress aging of polymeric insulatorsunder San Francisco coastal environment,» σε *IEEE 2000 annual report conference onElectrical insulation and DielectricPhenomena (2000)*, 2000.
- [42] S. M. Rowland, Y. Xiong, J. Robertson, S. Hoffmann, Aging of Silicone Rubber Composite Insulators on 400 kV Transmission Lines, IEEE, 2007.
- [43] J. Kim, M. K. Chaudhury and M. J. Owen, «Hydrophobicity Loss and Recovery of Silicone HV Insulation,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electfical Insulation*, Vol. 6 No. 5, 1999.
- [44] Imakoma, T., Suzuki, Y., Fujii, O., Nakajima, I., «Degradation of silicone rubber housing by ultraviolet radiation,» 1994.
- [45] R.S. Gorur, Outdoor Insulators: Gorur R.S., 2001.
- [46] S. Kumar, V. Dave, «Impact of Pollution on High Voltage Insulators: Research Status and Recommendations,» *International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 9, Issue 2*, February 2018.
- [47] X.Wang, S.Kumagai, N.Yoshimura, «Contamination performances of silicone rubber insulator subjected to acid rain.,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 5(6): pp. 909-916, 1998.

- [48] K.Siderakis, D.Agoris, D.Tsanakas, E.Thalassinakis, I.Vitellas, J.Stefanakis, «Performance of 150kV RTV SIR coated substation insulators under extreme marine pollution conditions,» CIGRE, 2006.
- [49] Ink., Sediver, «Application Guide for Composite Suspension Insulators,» York, 1993.
- [50] G.Montoya, I.Ramirez and J.I.Montoya, «Correlation among ESDD, NSDD and leakage current in distribution insulators,» Mexico, 2003.
- [51] IEC 815, «Guide for the selection of insulators in respect of pollution condition - First edition,» 1986.
- [52] IEC 60507, «Artificial pollution test on high voltage insulators to be used on a.c. systems,» 1991.
- [53] IEC 60815-3, «Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 3: Polymer insulators for a.c. systems,» 2008.
- [54] IEC 60815-1, «Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 1: Definitions, information and general principles,» 2008.
- [55] M. Amin, M. Akbar and S. Amin, «Hydrophobicity of silicone rubber used for outdoor insulation (An Overview),» Taxila, Pakistan, 2007.
- [56] S.M.Rowland, J.Robertson, Y.Xiong, and R.J.Day, «Electrical and Material Characterization of Field-Aged 400 kV Silicone Rubber Composite Insulators,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 17, Issue 2, pp. 375-383, April 2010.
- [57] Z. GUAN, K. Niu, G. Peng, F. Zhang, L. WANG, B. Lutz, «Hydrophobicity Transfer Property of Silicone Rubber Material,» *IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnostics*, September 2012.
- [58] Brown, R., *Physical Test Methods for Elastomers*, Springer, 2018.
- [59] Fisher Scientific, «www.fishersci.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.fishersci.com/us/en/home.html>. [Πρόσβαση 11 March 2021].
- [60] J. B. Patterson and E. C. Morris, «Measurement of Absolute Water Density, 1°C to 40 °C,» *Metrologia*, 1994.
- [61] Κ. Μαγουλάς, Ε. Βουτσάς, «Ισορροπία υγρού-υγρού,» σε *Προχωρημένη*

- Θερμοδυναμική - Σημειώσεις, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ.*
- [62] wikipedia.org, «Wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://wikipedia.org/wiki/Νερό>.
- [63] Ν.Φλυτζάνης, «Κεφάλαιο 1. Φυσικές ιδιότητες των υγρών,» σε *Υδροδυναμική*, Ηράκλειο, Πανεπιστήμιο Κρήτης, 2013, p. 54.
- [64] Fr. E. Jones and G. L. Harris, «ITS-90 Density of water formulation for volumetric standard calibration,» *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, May-June 1992.
- [65] F. Schmuck, S. Aitken, K. O. Papailiou, «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,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 394-401, 2010.
- [66] Cigre Working Group B2.21, «Guide for the Assessment of Composite Insulators in the Laboratory after their Removal from Service,» *Cigre Technical Brochure 481*, 2011.
- [67] IEC TS 62073, «Guidance on the measurement of hydrophobicity of insulator surfaces, Ed. 2.0,» 2016.
- [68] ISO 48-4, «Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of hardness — Part 4: Indentation hardness by durometer method (Shore hardness) , Ed. 1.0,» 2018.
- [69] ISO 27-81, «Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of density, Ed. 5.0,» 2018.
- [70] IEC 60587, «Electrical insulating materials used under severe ambient conditions - Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion,» 2007.
- [71] IEC 61109, «Insulators for overhead lines – Composite suspension and tension insulators for a.c. systems with a nominal voltage greater than 1 000 V – Definitions, test methods and acceptance criteria , Ed. 2,» 2008.
- [72] IEC 61952, «Insulators for overhead lines – Composite line post insulators for A.C. systems with a nominal voltage greater than 1 000 V – Definitions, test methods and acceptance criteria, Ed. 2,» 2008.
- [73] I. Gutman, A. Dernfalk, P. Sidenvall, J. Lundengård, C. Ahlrot, P. Aparicio, A.

- Berlin, T. Condon, J.-F. Goffinet, K. Halsan, M. Radosavljevic, K. Varli, K. Välimaa, «Rod to Housing Adhesion in Composite Insulators: Practical Evaluation in Collaboration with Utilities,» σε *INMR World Congress*, 2019.
- [74] DIN 53505, «Shore A and Shore D hardness testing of rubber,» 2000.
- [75] P. Liu, L. Li, L. Wang, T. Huang, Y. Yao, W. Xu, «Effects of 2D boron nitride (BN) nanoplates filler on the thermal, electrical, mechanical and dielectric properties of high temperature vulcanized silicone rubber for composite insulators,» *Journal of Alloys and Compounds*, 774(5), pp. 396-404, 2019.
- [76] 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.
- [77] Δημόσια Επιχείριση Ηλεκτρισμού, *Τεχνική Περιγραφή ΔΕΗ ΔΔ - 204/20.11.2008 - Συνθετικοί μονωτήρες ανάρτησης και στήριξης*, Αθήνα, 2008.
- [78] STRI Guide, «Hydrophobicity Classification Guide,» 1992. [Ηλεκτρονικό]. Available: http://212.85.76.103/wwwpublic/STRI_Guide_1_92_1.pdf. [Πρόσβαση February 2021].
- [79] Young, T., An essay on the cohesion of fluids. *Philosophy Transactions R Social London*, London, 1805.
- [80] Yang P., M.G.Moloney, F.Zhang, and W.Ji., «Surface hydrophobic modification of polymers with fluorodia-zomethanes,» *Materials Letters*, p. 210:295–97, 2018.
- [81] ASTM International, «American Society for Testing and Material,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.astm.org/>.
- [82] Adam Equipment Company, «Density determination kit for NBL 623i,» σε *Balance User Manual*, © Adam Equipment Company, 2015.
- [83] Δ. Μέντζαφός, *Ειδικά Κεφάλαια Φυσικής για Φοιτητές Των Γεωπονικών Επιστημών*, Εκδόσεις Α. Σταμούλης, 1997.
- [84] Γ. Σταύρου, «Διπλωματική Εργασία - Διαμοριακές Δυνάμεις,» σε *Ειδίκευση Καθηγητών των Φυσικών Επιστημών(ΚΦΕ)*, Πάτρα, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο - Σχολή Θετικών Επιστημών και τεχνολογίας, 2020.
- [85] Μετεωρολογικός σταθμός Παλαιοκούνδουρας Μάνδρας Αττικής, «meteo.gr,» Ιδιοκτησία: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, [Ηλεκτρονικό]. Available:

- <https://penteli.meteo.gr/stations/mandra/NOAAPRYR.TXT>. [Πρόσβαση 16 February 2021].
- [86] KERN & SOHN GmbH, «www.kern-sohn.com,» 3 March 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.kern-sohn.com/shop/en/laboratory-balances/precision-balances/EWJ/>.
- [87] Cigre Working Group, «Guide for the Assessment of Composite Insulators in the Laboratory after their Removal from Service,» σε *Cigre Technical Brochure B2.21,k 481*, 2011.
- [88] EPRI, Field guide: visual inspection of polymer insulators, 2006.
- [89] J.E. Mark, «Some interesting things about polysiloxanes. Accounts of Chemical reasearch,» 2004, pp. pp. 946-953.
- [90] Mosch, R. Arora & W., High Voltage and Electrical Insulation Engineering, Wiley, 2011.
- [91] Henan HengXin, «Henan HengXin βιομηχανική & μεταλλικά προϊόντα Co, Ltd,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://m.gr.hxminerial.com/>.
- [92] Izoelektro d.o.o., «Izoelektro d.o.o.Slovenia, EU,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.izoelektro.com/>.
- [93] S.H.Kim, E.A.Cherney, R.Hackam, «Effects of filer level in RTV Silicone rubber,» *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, pp. pp. 1029-1039, 1996.
- [94] Αλκ. Μπάης, «Η Υπεριώδης Ηλιακή Ακτινοβολία και επιδράσεις της στον άνθρωπο,» ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, 2015.
- [95] Νικ. Ανδρικόπουλος, «Το Νερό,» σε *Τροφογνωσία*, Αθήνα, Εκδόσεις Κάλλιπος, 2015, pp. pp. 186-201.

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1.1 Μονωτήρες που χρησιμοποιούνταν σε δίκτυα τηλεγράφων και στη μεταφορά Η.Ε. [1]	10
Εικόνα 1.2 Πορσελάνινος μονωτήρας ανάρτησης τύπου μεγάλου μήκους [11]	12
Εικόνα 1.3 Διαστάσεις κεραμικών μονωτήρων στήριξης τύπου pin βάσει προδιαγραφών ΔΕΗ [13]	13
Εικόνα 1.4. Μονωτήρες ανάρτησης τύπου cap & pin από πορσελάνη [16]	18
Εικόνα 1.5. Γυάλινος μονωτήρας ανάρτησης cap & pin τύπου ομίχλης [17].....	19
Εικόνα 1.6. Συνθετικός μονωτήρας [8]	21
Εικόνα 1.7 Διάφορα σχέδια μεταλλικών ακροδεκτών (αριστερά) και πυρήνες διαφορετικής διαμέτρου από εποξειδική ρητίνη (δεξιά) συνθετικών μονωτήρων [20].....	21
Εικόνα 1.8 Ακροδέκτες ενσωματωμένοι στους πυρήνες (αριστερά) πριν το στάδιο της χύτευσης του ελαστομερούς περιβλήματος (δεξιά) [92]	22
Εικόνα 1.9 Χημική δομή του ατόμου του EPDM [22]	23
Εικόνα 1.10 Χημική δομή του PDMS [24]	24
Εικόνα 1.11 Ελαστομερές σιλικόνης πριν το βουλκανισμό (αριστερά) και κατά τη χύτευσή του (δεξιά) [20]	25
Εικόνα 1.12 Νιτρίδιο του βορίου (αριστερά) και αλουμίνα (Al_2O_3) (δεξιά) [91]	27
Εικόνα 1.13 Φωτογραφίες της επιφάνειας ελαστομερούς σιλικόνης (α) και ελαστομερούς σιλικόνης με κοίλα μικροσφαιρίδια (b), από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης [36]...	28
Εικόνα 2.1. Γήρανση και είδη καταπονήσεων. [39].....	30
Εικόνα 2.2 Βασικά στάδια δημιουργίας των εκκενώσεων ξηράς ζώνης και της υπερπήδησης στους υπαίθριους μονωτήρες [46]	33
Εικόνα 2.3 α) Εναπόθεση ρύπων σε μονωτήρες ανάρτησης τύπου cap & pin β) Εκκενώσεις ξηρής ζώνης [49]	35
Εικόνα 2.4 Υδρόφιλη επιφάνεια (αριστερά) υψηλής εσωτερικής ενέργειας και υδρόφοβη επιφάνεια (δεξιά) [67]	38
Εικόνα 2.5 Σύγχρονη ζυγαριά ισορροπίας [59]	42
Εικόνα 2.6 Τετραεδρική διάταξη των μορίων του νερού (αριστερά) και διάταξη του κρυσταλλικού πλέγματος των μορίων του πάγου (δεξιά) [95]	44
Εικόνα 3.1 Ηλεκτρονικός μετρητής σκληρότητας ελαστικών της εταιρίας Bareiss [76].....	49
Εικόνα 3.2 Φωτογραφίες επιφανειών με τις 6 διαφορετικές κλάσεις υδροφοβικότητας [67].	56

Εικόνα 3.3 Ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας με τον εξοπλισμό για μέτρηση πυκνότητας στερεού σώματος της εταιρείας ADAM [84].....	59
Εικόνα 3.4 Τα κομμάτια από το δοκίμιο για τη μέθοδο Β στις κατάλληλες διαστάσεις.....	62
Εικόνα 3.5 Καμπυλότητα της επιφάνειας του υγρού σε σωλήνα	63
Εικόνα 4.1 Χαρακτηριστικά του Ελληνικού δικτύου διανομής Μέσης Τάσης [77].....	64
Εικόνα 4.2 Οι μονωτήρες στους οποίους θα γίνουν οι μετρήσεις	64
Εικόνα 4.3 Περιβαλλοντικές συνθήκες υπό τις οποίες οι μονωτήρες λειτουργούν βάσει τεχνικής προδιαγραφής ΔΕΗ [77]	66
Εικόνα 4.4 Οι θερμοκρασίες ανά μήνα από τον μετεωρολογικό σταθμό στην περιοχή Παλαιοκούνδουρα Μάνδρας.....	67
Εικόνα 4.5 Μέση ταχύτητα ανέμου και βροχόπτωση ανά μήνα από τον μετεωρολογικό σταθμό στην περιοχή Παλαιοκούνδουρα Μάνδρας [85]	67
Εικόνα 4.6 Ανάλυση κωδικής ονομασίας των μονωτήρων	68
Εικόνα 4.7 Δοχείο ψεκασμού απιονισμένου νερού	70
Εικόνα 4.8 Φωτογραφίες από τον οπτικό έλεγχο του μονωτήρα ZBS1	71
Εικόνα 4.9 Τσάκιση των κυαθίων του ZBS1.....	72
Εικόνα 4.10 Δοκιμή σωστής συγκόλλησης του περιβλήματος στον πυρήνα του ZBS1	72
Εικόνα 4.11 Μετρήσεις υδροφοβικότητας του μονωτήρα ZBS1.....	73
Εικόνα 4.12 Φωτογραφίες από τον οπτικό έλεγχο του συνθετικού μονωτήρα ZBS2.....	75
Εικόνα 4.13 Τσάκιση των κυαθίων του μονωτήρα ZBS2	76
Εικόνα 4.14 Δοκιμή σωστής συγκόλλησης περιβλήματος στον μονωτήρα ZBS2	76
Εικόνα 4.15 Δοκιμή υδροφοβικότητας του μονωτήρα ZBS2.....	77
Εικόνα 4.16 Φωτογραφίες από τον οπτικό έλεγχο του μονωτήρα ETP3	79
Εικόνα 4.17 Τσάκιση κυαθίων του μονωτήρα ETP3.....	80
Εικόνα 4.18 Έλεγχος σωστής συγκόλλησης του συνθετικού περιβλήματος.....	80
Εικόνα 4.19 Δοκιμή υδροφοβικότητας στον συνθετικό μονωτήρα ETP3	81
Εικόνα 4.20 Φωτογραφίες από τον οπτικό έλεγχο του μονωτήρα GNP4.....	83
Εικόνα 4.21 Τσάκιση των κυαθίων του μονωτήρα GNP4.....	84
Εικόνα 4.22 Έλεγχος σωστής συγκόλλησης του συνθετικού περιβλήματος του GNP4	84
Εικόνα 4.23 Δοκιμή υδροφοβικότητας στον συνθετικό μονωτήρα GNP4	85
Εικόνα 4.24 Φωτογραφίες από τον οπτικό έλεγχο του συνθετικού μονωτήρα GNP5	87
Εικόνα 4.25 Τσάκιση των κυαθίων του μονωτήρα GNP5.....	88
Εικόνα 4.26 Δοκιμή υδροφοβικότητας του μονωτήρα GNP5	89
Εικόνα 4.27 Φωτογραφίες από τον οπτικό έλεγχο του μονωτήρα ZRP6	91

Εικόνα 4.28 Η άνω επιφάνεια του κυαθίου ZRP6.7	92
Εικόνα 4.29 Τσάκιση των κυαθίων του μονωτήρα ZRP6.....	92
Εικόνα 4.30 Δοκιμή υδροφοβικότητας στον συνθετικό μονωτήρα ZRP6	93
Εικόνα 4.31 Φωτογραφίες από τον οπτικό έλεγχο των μονωτήρων ZRS7N και ZRP8N	95
Εικόνα 4.32 Έλεγχος σωστής συγκόλλησης του συνθετικού περιβλήματος στους ακροδέκτες του ZRS7N.....	96
Εικόνα 4.33 Δοκιμή υδροφοβικότητας στον συνθετικό μονωτήρα ZRS7N.....	97
Εικόνα 4.34 Δοκιμή υδροφοβικότητας στον συνθετικό μονωτήρα ZRP8N.....	98
Εικόνα 4.35 Αφαίρεση των υπό μελέτη κυαθίων από τους συνθετικούς μονωτήρες.....	99
Εικόνα 4.36 Ο ζυγός ακριβείας KERN του εργαστηρίου υψηλών τάσεων και ηλεκτρικών μετρήσεων του ΕΜΠ	101
Εικόνα 4.37 Προετοιμασία του δοκιμίου από το κυάθιο ZRP8N.1 (αριστερά) και το δοκίμιο με το νερό και το αναδευτήρα στον ογκομετρικό σωλήνα (δεξιά)	102

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 2.1 Μεταβολή της επιφανειακής αντίστασης σε σχέση με την περιβάλλουσα υγρασία. α: υαλώδη πορσελάνη, β: μη υαλώδη πορσελάνη [1]	30
Σχήμα 2.2 Το ελάχιστο μοναδιαίο ειδικό μήκος ερπυσμού μετρούμενο σε mm/kV (φασική τάση) ανά επίπεδο ρύπανσης για συνθετικούς μονωτήρες σύμφωνα με την τεχνική οδηγία IEC 90815-3/2008. Διαβάθμιση ρύπανσης της περιοχής: α) πολύ ελαφριά, β) ελαφριά, γ) μεσαία, δ) βαριά, ε) πολύ βαριά [53]	37
Σχήμα 3.1 Στατική γωνία επαφής (θ_s) που δημιουργεί η σταγόνα υγρού όταν έρχεται σε επαφή με στερεή επιφάνεια [67]	52
Σχήμα 3.2 Μετρήσεις της γωνίας υποχώρησης (θ_r) και της γωνίας προώθησης (θ_a) προσθέτοντας ή αφαιρώντας νερό από τη σταγόνα [67]	53
Σχήμα 3.3 Ορισμός της αύξουσας γωνίας (θ_a) και της φθίνουσας γωνίας (θ_r) σε σταγόνα υγρού επικείμενη σε κεκλιμένη στερεή επιφάνεια [67]	53
Σχήμα 4.1 Γραφική παράσταση βάσει των τιμών πυκνότητας του Πίνακα 2.3.....	103
Σχήμα 4.2 Πυκνότητα και κλάση υδροφοβικότητας ανά κυάθιο του μονωτήρα ZBS1.....	104
Σχήμα 4.3 Πυκνότητα και κλάση υδροφοβικότητας ανά κυάθιο του μονωτήρα ZBS2	104
Σχήμα 4.4 Πυκνότητα και κλάση υδροφοβικότητας ανά κυάθιο του μονωτήρα ETP3.....	105
Σχήμα 4.5 Πυκνότητα και κλάση υδροφοβικότητας ανά κυάθιο του μονωτήρα GNP4.....	106
Σχήμα 4.6 Πυκνότητα και κλάση υδροφοβικότητας ανά κυάθιο του μονωτήρα GNP5.....	107
Σχήμα 4.7 Πυκνότητα και κλάση υδροφοβικότητας ανά κυάθιο του μονωτήρα ZRP6	107
Σχήμα 4.8 Πυκνότητα και κλάση υδροφοβικότητας ανά κυάθιο του μονωτήρα ZRS7N	108
Σχήμα 4.9 Πυκνότητα και κλάση υδροφοβικότητας ανά κυάθιο του μονωτήρα ZRP8N	109
Σχήμα 4.10 Πυκνότητα κυαθίου .1 (εγγύτερο στον ηλεκτροφόρο αγωγό) ανά μονωτήρα στήριξης.....	110
Σχήμα 4.11 Πυκνότητα μέσου κυαθίου ανά μονωτήρα στήριξης.....	110
Σχήμα 4.12 Πυκνότητα κυαθίου .7 (εγγύτερο στο βραχίονα στήριξης) ανά μονωτήρα στήριξης	111
Σχήμα 4.13 Πυκνότητα κυαθίων ανά μονωτήρα στήριξης	112
Σχήμα 4.14 Πυκνότητα κυαθίου .9 (εγγύτερο στον αγωγό) ανά μονωτήρα ανάρτησης.....	113
Σχήμα 4.15 Πυκνότητα μέσου κυαθίου ανά μονωτήρα ανάρτησης	113
Σχήμα 4.16 Πυκνότητα κυαθίου .1 (εγγύτερο στο βραχίονα) ανά μονωτήρα ανάρτησης.....	114
Σχήμα 4.17 Πυκνότητα κυαθίου ανά μονωτήρα ανάρτησης	114

Παράρτημα

INSULATORS	No.	Density of Water			Density of EUT								Calculations																			
		Water Temp [°C]	Volume [ml or cm ³]	d _{water2} [gr/cm ³]	m1 [gr]	m2 [gr]	m3 [gr]	m4 [gr]	m2-m1 [gr]	Σφάλμα [%]	m4-m3 [gr]	Volume [ml or cm ³]	d _{EUT} [gr/cm ³]	μ [gr/cm ³]	μ _{0a} [gr/cm ³]	HC	σ [gr/cm ³]	σ _{0a} [gr/cm ³]	σ _{M.O.} [gr/cm ³]	max [gr/cm ³]	max _{0a} [gr/cm ³]	min [gr/cm ³]	min _{0a} [gr/cm ³]									
ZBS1	2010	18/02/21 - 190C - 43% - 997mBar	21.00	60.00	0.9978750	93.771	153.008	60.000						1.538	1.600	3	0.028	0.047	0.047		1.569	1.684	1.516									
																									L	97.400	154.268	3.629	0.38728%	-1.260	1.529	
																									R	96.841	154.126	3.070	0.26127%	-1.118	1.569	
																									LR	96.722	154.016	2.951	0.34002%	-1.008	1.516	
																									L	96.732	154.110	2.961	0.47506%	-1.102	1.589	
																									R	96.624	154.081	2.853	0.42239%	-1.073	1.599	
	2010	2	18/02/21 - 190C - 43% - 997mBar	21.00	60.00	0.9978750	93.771	153.008	60.000						1.594	1.600	3	0.005	0.047	0.047		1.599	1.684	1.589								
																										L	96.399	153.989	2.628	0.53558%	-0.981	1.592
																										R	96.702	154.139	2.931	0.34235%	-1.131	1.625
																										LR	96.771	154.171	3.000	0.26738%	-1.163	1.630
																										L	96.533	154.047	2.762	0.43636%	-1.039	1.600
																										R	97.630	154.580	3.859	0.28586%	-1.572	1.684
2010	4	18/02/21 - 190C - 43% - 997mBar	21.00	60.00	0.9978750	93.771	153.008	60.000						1.649	1.600	4	0.030	0.047	0.047		1.684	1.630	1.600									
																									L	96.549	154.085	2.778	0.43384%	-1.077	1.630	
																									R	97.702	154.171	3.000	0.26738%	-1.163	1.630	
																									LR	96.533	154.047	2.762	0.43636%	-1.039	1.600	
																									L	97.630	154.580	3.859	0.28586%	-1.572	1.684	
																									R	96.861	154.210	3.090	0.35726%	-1.202	1.633	
ZBS2	2010	18/02/21 - 190C - 43% - 997mBar	21.00	60.00	0.9978750	93.771	153.008	60.000						1.644	1.648	5	0.016	0.033	0.033		1.663	1.692	1.633									
																									L	97.545	154.476	3.774	0.23791%	-1.468	1.633	
																									R	97.364	154.410	3.593	0.02784%	-1.402	1.636	
																									LR	96.954	154.281	3.183	0.21944%	-1.273	1.663	
																									L	97.127	154.342	3.356	0.11905%	-1.334	1.656	
																									R	97.557	154.561	3.786	0.13189%	-1.553	1.692	
	2010	3	18/02/21 - 190C - 43% - 997mBar	21.00	60.00	0.9978750	93.771	153.008	60.000						1.651	1.648	5	0.043	0.033	0.033		1.692	1.692	1.606								
																										L	97.537	154.434	3.766	0.02656%	-1.426	1.606
																										R	97.133	154.306	3.362	0.05945%	-1.298	1.625
																										LR	97.499	154.535	3.728	0.10718%	-1.527	1.690
																										L	96.935	154.225	3.164	0.06325%	-1.217	1.622
																										R	96.576	154.125	2.805	0.07135%	-1.117	1.658
2010	9	18/02/21 - 190C - 43% - 997mBar	21.00	60.00	0.9978750	93.771	153.008	60.000						1.649	1.648	5	0.047	0.033	0.033		1.691	1.630	1.598									
																									L	96.901	154.291	3.130	0.03194%	-1.283	1.691	
																									R	96.887	154.178	3.116	0.25740%	-1.170	1.598	
																									LR	97.310	154.309	3.539	0.22656%	-1.301	1.578	
																									L	97.529	154.320	3.758	0.05325%	-1.312	1.533	
																									R	97.668	154.360	3.897	0.00000%	-1.352	1.528	
ETP3	2012	18/02/21 - 190C - 43% - 997mBar	21.00	60.00	0.9978750	93.771	153.008	60.000						1.546	1.583	4	0.027	0.037	0.037		1.578	1.630	1.528									
																									L	97.753	154.550	3.982	0.10055%	-1.542	1.628	
																									R	97.632	154.432	3.861	0.25967%	-1.424	1.581	
																									LR	97.220	154.278	3.449	0.23249%	-1.270	1.579	
																									L	96.507	154.011	2.736	0.18308%	-1.003	1.575	
																									R	97.151	154.304	3.380	0.08884%	-1.296	1.618	
	2012	3	18/02/21 - 190C - 43% - 997mBar	21.00	60.00	0.9978750	93.771	153.008	60.000						1.596	1.583	3	0.028	0.037	0.037		1.628	1.630	1.579								
																										L	96.485	154.060	2.714	0.42931%	-1.052	1.630
																										R	97.310	154.309	3.539	0.22656%	-1.301	1.578
																										LR	97.529	154.320	3.758	0.05325%	-1.312	1.533
																										L	97.668	154.360	3.897	0.00000%	-1.352	1.528
																										R	97.753	154.550	3.982	0.10055%	-1.542	1.628
GNP4	2014	27/01/21 - 230C - 40% - 985mBar	23.00	60.00	0.9973950	93.772	152.955	60.000						1.535	1.545	4	0.011	0.039	0.039		1.548	1.634	1.528									
																									L	96.392	153.867	2.620	0.07628%	-0.912	1.530	
																									R	97.765	154.341	3.993	0.02505%	-1.386	1.528	
																									LR	96.774	154.023	3.002	0.09983%	-1.068	1.548	
																									L	96.489	153.869	2.717	0.07366%	-0.914	1.503	
																									R	97.037	154.152	3.265	0.21394%	-1.197	1.575	
	2014	4	27/01/21 - 230C - 40% - 985mBar	23.00	60.00	0.9973950	93.772	152.955	60.000						1.533	1.545	4	0.037	0.039	0.039		1.575	1.634	1.503								
																										L	96.592	153.927	2.820	0.35336%	-0.972	1.522
																										R	97.247	154.163	3.475	0.20103%	-1.208	1.529
																										LR	96.760	153.998	2.988	0.33356%	-1.043	1.532
																										L	96.800	154.135	3.028	0.29635%	-1.180	1.634
																										R	96.800	154.135	3.028	0.29635%	-1.180	1.634
GNP5	2017	27/01/21 - 210C - 40% - 1003mBar	21.00	60.00	0.9978750	93.772	152.731	60.000						1.552	1.548	3	0.030	0.023	0.012		1.586	1.586	1.528									
																									L	96.559	153.715	2.787	0.14332%	-0.984	1.542	
																									R	97.197	154.001	3.425	0.20396%	-1.270	1.586	
																									LR	96.569	153.699	2.797	0.21406%	-0.968	1.526	
																									L	96.697	153.796	2.925	0.30675%	-1.065	1.569	
																									R	96.803	153.844	3.031	0.26324%	-1.113	1.577	
	2017	7	27/01/21 - 210C - 40% - 1003mBar	21.00	60.00	0.9978750	93.772	152.731	60.000						1.534	1.548	4	0.009	0.023	0.012		1.543	1.586	1.525								
																										L	96.846	153.794	3.074	0.25957%	-1.063	1.525
																										R	97.113	153.900	3.341	0.23888%	-1.169	1.535
																										LR	96.955	153.855	3.183	0.21944%	-1.124	1.543
																										L	96.846	153.794	3.074	0.25957%	-1.063	1.525
																										R	96.846	153.794	3.074	0.25957%	-1.063	1.525
ZRP6	2018	27/01/21 - 210C - 40% - 1003mBar	21.00	60.00	0.9978750	93.772	152.731	60.000						1.659	1.647	4	0.027	0.037	0.034		1.691	1.702	1.589									
																									L	96.656	153.913	2.884	0.10391%	-1.182	1.691	
																									R	97.004	153.998	3.232	0.09274%	-1.267	1.646	
																									LR	97.027	154.013	3.255	0.09208%	-1.282	1.646	
																									L	97.481	154.133	3.709	0.02695%	-1.402	1.604	
																									R	97.536	154.193	3.764	0.05316%	-1.462	1.632	
	2018	3	27/01/21 - 210C - 40% - 1003mBar	21.00	60.00	0.9978750	93.772	152.731	60.000						1.608	1.647	4	0.022	0.037	0.034		1.632	1.702	1.589								
																										L	97.470	154.107	3.698	0.08106%	-1.376	1.589
																										R	96.430	153.805	2.658	0.03764%	-1.074	1.674
																										LR	97.022	154.002	3.250	0.18428%	-1.271	1.639
																										L	96.520	153.868	2.748	0.18162%	-1.137	1.702
																										R	96.520	153.868	2.748	0.18162%	-1.137	1.702
ZRS7N	2018	27/01/21 - 230C - 40% - 985mBar	23.00	60.00	0.9973950	93.772	152.731	60.000						1.651	1.598	2	0.101	0.077	0.051		1.762	1.762	1.564									
																									L	96.638	153.975	2.866	0.03490%	-1.244	1.762	
																									R	96.787	153.823	3.015	0.06638%	-1.092	1.564	
																									LR	96.734	153.878	2.962	0.00000%	-1.147	1.628	
																									L	96.619	153.753	2.847	0.10526%	-1.022	1.556	
																									R	96.969	153.847	3.197	0.12496%	-1.116	1.532	
	2018	3	27/01/21 - 230C - 40% - 985mBar	23.00	60.00	0.9973950	93.772	152.731	60.000						1.																	