



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Συμβολή στη Μελέτη των Συνθετικών Μονωτήρων

Διδακτορική Διατριβή

Χρήστος Χριστόδουλος Αθ. Κοκάλης

Αθήνα, Ιούλιος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ
ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Συμβολή στη Μελέτη των Συνθετικών Μονωτήρων

Διδακτορική Διατριβή του

Χρήστου Χριστόδουλου Αθ. Κοκάλη

Συμβουλευτική Επιτροπή : Ιωάννης Φ. Γκόνος

Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου

Ιωάννης Μ. Προυσαλίδης

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 18^η Ιουλίου 2024.

Ι.Φ. Γκόνος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Χ.Αθ. Χριστοδούλου
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ι.Μ. Προυσαλίδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ε.Χ. Πυργιώτη
Καθηγήτρια Παν. Πατρών

Γ. Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Α. Αντωνόπουλος
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Β. Θ. Κονταργύρη
Επ. Καθηγήτρια Παν. Δυτ. Αττικής

Αθήνα, Ιούλιος 2024



.....

Χρήστος Χριστόδουλος Αθ. Κοκάλης

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

Copyright © Χρήστος Χριστόδουλος Αθ. Κοκάλης, 2024.

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.

Περίληψη

Στη σημερινή εποχή, οι συνθετικοί μονωτήρες χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στα δίκτυα διανομής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, αντικαθιστώντας τους συμβατικούς μονωτήρες, οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι από άλλα υλικά (γυαλί, πορσελάνη). Επομένως, κρίνεται επιτακτική η ανάγκη της επιθεώρησης και αξιολόγησης της ποιότητάς τους μέσω δοκιμών, μετρήσεων και ελέγχων. Σκοπός της διδακτορικής διατριβής είναι η μελέτη και η διεξαγωγή δοκιμών που περιγράφονται σε διεθνή Πρότυπα, καθώς και η πρόταση τροποποίησης αυτών ή εύρεσης νέων δοκιμών με στόχο τον αξιόπιστο έλεγχο της ποιότητας των συνθετικών μονωτήρων στον ελάχιστο δυνατό χρόνο.

Στο θεωρητικό μέρος της διατριβής πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική έρευνα σχετική με τις δοκιμές / ελέγχους σε συνθετικούς μονωτήρες που είτε περιλαμβάνονται ήδη σε διεθνή Πρότυπα, είτε μελετώνται ερευνητικά. Στο ερευνητικό μέρος της διατριβής διεξήχθησαν δοκιμές σε συνθετικούς μονωτήρες διαφόρων κατασκευαστών και ηλικίας δημιουργώντας μία βάση δεδομένων με τα αποτελέσματά τους, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διεξαγωγή γενικών συμπερασμάτων, καθώς και ως αναφορά για μελλοντικές έρευνες. Επίσης έγινε αποσαφήνιση και καταγραφή των πιο σημαντικών ευρημάτων των δοκιμών που εξετάστηκαν και προτάθηκαν τροποποιήσεις στη διαδικασία διεξαγωγής των δοκιμών που περιγράφονται στα διεθνή Πρότυπα. Η διατριβή αυτή συνέβαλλε επιπροσθέτως στη διαμόρφωση των προσδοκώμενων ευρών τιμών των δοκιμών, όταν αυτές εφαρμόζονται σε HTV silicone rubber συνθετικούς μονωτήρες, καθώς επίσης και στη μείωση του χρόνου εκτέλεσης ορισμένων δοκιμών με νέες διαδικασίες.

Τα πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής του κεκλιμένου επιπέδου και της υδροφοβικότητας αξιοποιήθηκαν για την ανάπτυξη υπολογιστικών μεθοδολογιών (πεδιακή προσέγγιση) και την επικύρωση των αποτελεσμάτων των μεθοδολογιών αυτών. Επιπλέον, παρουσιάστηκε μια μεθοδολογία για την αξιολόγηση των μετρήσεων της σκληρότητας Shore A, που αναπτύχθηκε μέσω υπολογισμού αβεβαιοτήτων. Παράλληλα, ετέθησαν τα θεμέλια για την απομακρυσμένη επιθεώρηση σε πραγματικό χρόνο των συνθετικών μονωτήρων στα ηλεκτρικά δίκτυα, μέσω της ανάπτυξης τεχνητού νευρωνικού δικτύου το οποίο μπορεί να ενσωματωθεί σε μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα (drones). Προτάθηκε, δε, μία εδραζομένη επ' αυτού μεθοδολογία για την εκτίμηση και πρόβλεψη της κλάσης υδροφοβικότητας των συνθετικών μονωτήρων με 98% ακρίβεια. Προτάθηκε,

επιπλέον, μια πειραματική μεθοδολογία που προσομοιώνει την καταπόνηση των συνθετικών μονωτήρων από νιτρικό οξύ στο ηλεκτρικό δίκτυο, καθώς επίσης και δύο μεθοδολογίες, που επικυρώθηκαν πειραματικά, σχετικά με τις δοκιμές μηχανικής καταπόνησης μέσω των οποίων ο χρόνος εκτέλεσης των δοκιμών: α) εφελκυσμού και β) κάμψης μειώνεται από τις 96 ώρες στα 3 λεπτά.

Λέξεις – Κλειδιά: συνθετικοί μονωτήρες, ποιοτικός έλεγχος, ηλεκτρικές δοκιμές, δοκιμές μηχανικής αντοχής, χημικές δοκιμές, δοκιμές υλικών, τεχνητή νοημοσύνη, κατανομή τάσης, κατανομή έντασης ηλεκτρικού πεδίου, πεδιακή προσομοίωση.

Abstract

Nowadays, composite insulators are increasingly used in electrical distribution and transmission networks, replacing conventional insulators made of other materials (glass, porcelain). Therefore, there is an imperative need to check and evaluate their quality via tests, measurements and inspections. The purpose of this PhD thesis is to investigate and conduct tests described in International Standards, as well as to propose modifications on them or find new tests aiming at reliably evaluating composite insulators' quality in the shortest test duration time.

In the theoretical part of the dissertation, an extensive literature review was carried out related to the tests / inspections on composite insulators that are either already included in International Standards, or are under investigation. In the experimental part of the thesis, tests were conducted on composite insulators of various manufacturers and ages (years in service), creating a database with their results, which can be used to draw general conclusions and as a reference for future research. The most important findings of the tests were clarified and recorded, and modifications to the test procedures of the International Standards were proposed. Furthermore, this thesis contributed to the recording of the expected test results when HTV silicone rubber composite insulators are tested, as well as to the test execution time reduction with new procedures.

The experimental results of the inclined plane test and hydrophobicity test were used in the development of calculating methodologies (field approach) and in the validation of the results of these methodologies. In addition, a methodology for the evaluation of Shore A hardness measurements was presented, based on uncertainties calculation. At the same time, the foundation stone for real-time remote inspection of composite insulators in electrical networks was laid out, via the development of an artificial neural network which could be integrated into unmanned aerial vehicles (drones). A methodology based on the above was proposed for estimating and predicting the hydrophobicity class of composite insulators with 98% accuracy. An experimental methodology simulating the composite insulators stress by nitric acid in the electrical networks was additionally proposed, as well as two experimentally validated methodologies, regarding the mechanical strength tests through which the execution time of: a) tensile strength test and b) bending test was reduced from 96 hours to 3 minutes.

Keywords: composite insulators, quality control, electrical testing, mechanical strength testing, chemical testing, material testing, artificial intelligence, voltage distribution, electric field distribution, electric field simulation.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όσους συνέδραμαν στην εκπόνηση της διδακτορικής μου διατριβής και συγκεκριμένα:

Τον επιβλέποντα Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, για την αποδοχή μου στη θέση του υποψηφίου διδάκτορα, για την αδιάλειπτη υποστήριξη του σε κάθε ανάγκη που προέκυπτε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής, για τον καθοδηγητικό του ρόλο και τις πολύτιμες συμβουλές του και για το άριστο κλίμα συνεργασίας που είχαμε.

Ευχαριστώ θερμά τον αείμνηστο Ομότιμο Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, αφ' ενός μεν για την προτροπή του να κάνω αίτηση ως υποψήφιος διδάκτορας, αφ' ετέρου δε για την πολύτιμη καθοδήγηση του και συμβολή του με σκοπό τη βελτίωση και την περάτωση της διατριβής μου.

Ευχαριστίες οφείλω επίσης στον Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Χρήστο Αθ. Χριστοδούλου για την αποδοχή συμμετοχής του στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή στη θέση του αείμνηστου Καθηγητή κ. Σταθόπουλου.

Ευχαριστώ ακόμη τον Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Ιωάννη Μ. Προυσαλίδη για την αποδοχή συμμετοχής του στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή.

Ευχαριστίες εκφράζω, επίσης, στον Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Φραγκίσκο Β. Τοπαλή και στην Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Πατρών κα. Ελευθερία Πυργιώτη για την αποδοχή συμμετοχής τους στην πενταμελή εξεταστική επιτροπή (της ενδιάμεσης κρίσης) και για τις συμβουλές βελτίωσης της διδακτορικής διατριβής που μου παρείχαν.

Ευχαριστώ, επίσης, τον Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Γεώργιο Κορρέ και τον Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Αντώνιο Αντωνόπουλο για την αποδοχή συμμετοχής τους στην επταμελή εξεταστική επιτροπή.

Ακόμη θερμές ευχαριστίες οφείλω στην Επίκουρη Καθηγήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής κα. Βασιλική Θ. Κονταργύρη για το αμείωτο ενδιαφέρον της και την προθυμία της να βοηθήσει σε κάθε δυσκολία που εμφανιζόταν μέχρι και την περάτωση της διδακτορικής μου διατριβής.

Πολλές θερμές ευχαριστίες οφείλω στον Καθηγητή του Τεχνικού Πανεπιστημίου Δρέσδης κ. Κωνσταντίνο Ο. Παπαηλιού καθώς, χωρίς τη συνεχή βοήθεια και καθοδήγηση του η εκπόνηση αυτής της διδακτορικής διατριβής θα ήταν ανέφικτη. Τον ευχαριστώ, επίσης, θερμά που με έφερε σε επαφή με τους υπαλλήλους (Μηχανικούς και Τεχνικούς) της εταιρείας PFISTERER Switzerland A.G, με σκοπό την καθοδήγηση μου σε οποιοδήποτε θέμα και απορία είχα σχετικά με τους συνθετικούς μονωτήρες.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τους κ. Αντώνιο Αναγνώστου και κ. Μάρκο Χαμπάκη από τον ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. για τη βοήθεια τους στην εύρεση των συνθετικών μονωτήρων που χρειαζόνταν για την εκπόνηση της διατριβής, καθώς και για τις συμβουλές, τη στήριξη και την καθοδήγηση που μου παρείχαν.

Ευχαριστώ πολύ τους υπαλλήλους (Μηχανικούς και Τεχνικούς) της εταιρείας PFISTERER Switzerland A.G. και ιδιαίτερος τη Διδάκτορα κα. Christiane Bär, τον Διπλωματούχο Μηχανικό κ. Jaka Strumbelj και τον Τεχνικό Εργαστηρίου κ. Elio Tinner για τη βοήθεια και τις συμβουλές που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής μου.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να αναφέρω και να ευχαριστήσω θερμά τους συνεργάτες μου: τον Υπ. Διδάκτορα του Εργαστηρίου Τεχνητής Νοημοσύνης και Συστημάτων Μάθησης του Ε.Μ.Π. κ. Αθανάσιο Τασάκο για τη συνεργασία που είχαμε στα πλαίσια της διατριβής και τους Διπλωματούχους Ηλεκτρολόγους Μηχανικούς και Μηχανικούς Υπολογιστών Ε.Μ.Π. κ. Ερμή Γ. Ο. Κατσαΐτη Βασιλείου, κ. Κωνσταντίνο Δ. Γιασαφάκη, κα. Γεωργία-Αναστασία Ν. Μαρούλη και κ. Γεώργιο Μ. Ρουσόπουλο, που με την εκπόνηση των διπλωματικών τους εργασιών συνέδραμαν σημαντικά στην πραγματοποίηση της παρούσας διατριβής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω, επίσης, θερμά και τα υπόλοιπα μέλη του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και συγκεκριμένα τους Διδάκτορες κ. Βασίλειο Ανδροβιτσανέα, την κα. Ελένη Νικολοπούλου και την κα. Manal Emara, τους Υποψήφιους Διδάκτορες κ. Παναγιώτη Παπασταμάτη, την κα. Αικατερίνη Δαμιανάκη και τον κ. Θεμιστοκλή Αθανασιάδη, την ΕΔΙΠ Διδάκτορα κα. Αικατερίνη Πολυκράτη, την ΕΔΙΠ κα. Νικολέτα Ηλία, τον ΕΤΕΠ κ. Χρήστο Ηλία, τον Τεχνικό κ. Αριστείδη Γιάννακα, τον ΕΤΕΠ κ. Γεώργιο Παντερή και τη Γραμματέα κα. Χρύσα Σιγάλα, για το εγκάρδιο κλίμα συνεργασίας που έχουμε τα τελευταία αυτά επτά χρόνια.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον άνθρωπο μου, την αγαπημένη μου Ευηλένα και την Οικογένεια μου, για την πολύπλευρη στήριξη, την υπομονή και τη βοήθεια που μου παρείχαν σε όλον τον αγώνα μου να φτάσω ως εδώ.

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract.....	7
Ευχαριστίες.....	9
Περιεχόμενα.....	12
Πρόλογος.....	17
Κεφάλαιο 1. Γενικά στοιχεία συνθετικών μονωτήρων	19
1.1 Ιστορική αναδρομή	19
1.2 Πλεονεκτήματα συνθετικών μονωτήρων	20
1.3 Βασικά δομικά στοιχεία των συνθετικών μονωτήρων	21
1.4 Τύποι συνθετικών μονωτήρων και χρήσεις αυτών	23
1.4.1 Συνθετικοί μονωτήρες μακράς ράβδου (long rod)	23
1.4.2 Συνθετικοί μονωτήρες στήριξης (post).....	25
1.4.3 Συνθετικοί μονωτήρες κοίλου πυρήνα (hollow core).....	28
Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση δοκιμών σε συνθετικούς μονωτήρες...32	32
2.1 Οπτική επιθεώρηση συνθετικών μονωτήρων	32
2.2 Δοκιμές στα υλικά των συνθετικών μονωτήρων	35
2.2.1 Δοκιμές στο μονωτικό περίβλημα	36
2.2.1.1 Δοκιμή υδροφοβικότητας	36
2.2.1.2 Δοκιμή μέτρησης της σκληρότητας Shore A	40
2.2.1.3 Δοκιμή προσδιορισμού της πυκνότητας.....	42
2.2.1.4 Δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου (inclined plane test).....	45
2.2.1.5 Δοκιμή εφελκυσμού και μέγιστης επιμήκυνσης (tensile strength and maximum elongation test).....	50
2.2.1.6 Δοκιμή προσδιορισμού της αντοχής σε σκίσιμο (Determination of tear strength)	54

2.2.1.7	Φασματοσκοπία υπέρυθρων μετασχηματισμού Fourier (Fourier transform infrared spectroscopy – FTIR)	58
2.2.1.8	Θερμοβαρυμετρική ανάλυση (Thermogravimetric analysis – TGA)...	62
2.2.1.9	Αντίσταση σε εκκενώσεις υπό υψηλή τάση και χαμηλό ρεύμα.....	68
2.2.1.10	Αντίσταση του μονωτικού περιβλήματος σε οξεία	72
2.2.2	Δοκιμές στη ράβδο.....	76
2.2.2.1	Δοκιμή διάχυσης νερού (Water diffusion test).....	76
2.2.2.2	Δοκιμή διείσδυσης βαφής (Dye penetration test).....	80
2.2.3	Δοκιμή ελέγχου της διεπαφής μεταξύ ράβδου και μονωτικού περιβλήματος.	84
2.3	Δοκιμές μηχανικής αντοχής των συνθετικών μονωτήρων	90
2.3.1	Δοκιμή εφελκυσμού.....	90
2.3.2	Δοκιμή κάμψης	96
2.3.3	Δοκιμή οξέος για τον έλεγχο του ECR glass (Corrosion-resistant glass fibre for electrotechnical applications).....	103
2.4	Ελληνικές διδακτορικές διατριβές σχετικές με μονωτήρες ηλεκτρικών δικτύων	108
Κεφάλαιο 3. Δοκιμές ελέγχου ποιότητας και μοντέλα προσομοίωσης σε συνθετικούς μονωτήρες		109
3.1	Συνθετικοί μονωτήρες του ελληνικού ηλεκτρικού δικτύου διανομής που συμμετέχουν στο πρόγραμμα δοκιμών	109
3.2	Πρόγραμμα δοκιμών	115
3.3	Οπτική επιθεώρηση συνθετικών μονωτήρων	116
3.4	Διερεύνηση της ποιότητας των υλικών των συνθετικών μονωτήρων	122
3.4.1	Διερεύνηση του μονωτικού περιβλήματος	122
3.4.1.1	Δοκιμή υδροφοβικότητας.....	122
3.4.1.1.1	Δοκιμή υδροφοβικότητας σε καινούριους και μεταχειρισμένους συνθετικούς μονωτήρες	122

3.4.1.1.2	Κατάταξη σε κλάσεις υδροφοβικότητας με χρήση συνελκτικού νευρωνικού δικτύου	127
3.4.1.1.3	Κατανομή δυναμικού και έντασης ηλεκτρικού πεδίου σε βρεγμένους συνθετικούς μονωτήρες	131
3.4.1.2	Μέτρηση της σκληρότητας Shore A	136
3.4.1.2.1	Μετρήσεις σκληρότητας Shore A σε καινούριους και μεταχειρισμένους συνθετικούς μονωτήρες.....	136
3.4.1.2.2	Επίδραση του πάχους των δοκιμίων στη μέτρηση της σκληρότητας Shore A	141
3.4.1.2.3	Σημεία των κυαθίων στα οποία προτείνεται να γίνεται η μέτρηση	146
3.4.1.2.4	Πρόταση υπολογισμού της αβεβαιότητας της μέτρησης σκληρότητας Shore A σε συνθετικούς μονωτήρες	149
3.4.1.3	Δοκιμή προσδιορισμού της πυκνότητας.....	160
3.4.1.4	Δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου (Inclined plane test).....	164
3.4.1.4.1	Δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου σε καινούριους και μεταχειρισμένους συνθετικούς μονωτήρες	164
3.4.1.4.2	Κατανομή δυναμικού και έντασης ηλεκτρικού πεδίου στη δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου.....	170
3.4.1.5	Δοκιμή εφελκυσμού και μέγιστης επιμήκυνσης (tensile strength and maximum elongation test).....	183
3.4.1.6	Δοκιμή προσδιορισμού της αντοχής σε σκίσιμο (Determination of tear strength)	189
3.4.1.7	Φασματοσκοπία υπέρυθρων μετασχηματισμού Fourier (Fourier transform infrared spectroscopy – FTIR)	194
3.4.1.8	Θερμοβαρυμετρική ανάλυση (Thermogravimetric analysis – TGA).	199
3.4.1.9	Αντίσταση σε εκκενώσεις υπό υψηλή τάση και χαμηλό ρεύμα στους συνθετικούς μονωτήρες του κατασκευαστή A	205
3.4.1.10	Αντίσταση του μονωτικού περιβλήματος σε οξεία	208
3.4.2	Διερεύνηση της ράβδου των συνθετικών μονωτήρων.....	212

3.4.2.1	Δοκιμή διάχυσης νερού (Water diffusion test).....	212
3.4.2.2	Δοκιμή διείσδυσης βαφής (Dye penetration test).....	218
3.4.3	Διερεύνηση της σύνδεσης της ράβδου με το μονωτικό περίβλημα (adhesion test)	223
3.5	Διερεύνηση της μηχανικής αντοχής των συνθετικών μονωτήρων	231
3.5.1	Διερεύνηση της αντοχής των συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης σε φορτίο εφελκυσμού.....	231
3.5.1.1	Εκδοχή Α: Γρήγορη δοκιμή εφελκυσμού.....	231
3.5.1.2	Εκδοχή Β: Γρήγορη δοκιμή εφελκυσμού με ενσωμάτωση ειδικής κατασκευής στους μεταλλικούς ακροδέκτες	234
3.5.1.3	Εκδοχή Γ: Δοκιμή εφελκυσμού 96 ωρών.....	240
3.5.1.4	Συγκρίσεις μεταξύ των διαφορετικών εκδοχών της δοκιμής εφελκυσμού	245
3.5.2	Διερεύνηση της αντοχής των συνθετικών μονωτήρων στήριξης σε φορτίο κάμψης	247
3.6	Επιταχυνόμενη γήρανση συνθετικών μονωτήρων.....	252
3.6.1	Δοκιμές μετά από γήρανση με βρασμό.....	253
3.6.2	Δοκιμές μετά από γήρανση με θέρμανση σε βιομηχανικό φούρνο	256
Κεφάλαιο 4. Συμβολή – Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα		259
4.1	Συμβολή - Πρωτοτυπία της διδακτορικής διατριβής.....	259
4.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	272
Βιβλιογραφία		275
Παράρτημα Α		299
Παράρτημα Β		313
Παράρτημα Γ		320
Παράρτημα Δ.....		327
Παράρτημα Ε		334

Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή, εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Ιωάννη Φ. Γκόνου και πραγματεύεται τον έλεγχο της ποιότητας των υλικών των συνθετικών μονωτήρων μέσω διάφορων δοκιμών, που είτε περιγράφονται ήδη σε διεθνή Πρότυπα, είτε βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο, μέσω προσομοιώσεων με λογισμικό πεδιακής ανάλυσης και μέσω της δημιουργίας νευρωνικού δικτύου, το οποίο συμβάλλει στην απόκτηση πιο αξιόπιστου αποτελέσματος σε διενεργηθείσα δοκιμή.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται σύντομη αναφορά σε γενικά στοιχεία γύρω από τους συνθετικούς μονωτήρες. Συγκεκριμένα, γίνεται μια ιστορική ανασκόπηση στην εξέλιξη των συνθετικών μονωτήρων και των υλικών από τα οποία κατασκευάζονται, αναλύονται τα πλεονεκτήματα τους σε σχέση με τους μονωτήρες άλλων υλικών, καθώς επίσης αναφέρονται τα βασικά δομικά μέρη των συνθετικών μονωτήρων. Επιπλέον, αναλύονται οι βασικοί τύποι συνθετικών μονωτήρων που υπάρχουν στα ηλεκτρικά δίκτυα και περιγράφονται οι βασικές εφαρμογές - χρήσεις τους σε αυτά.

Μια εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση, σχετική με διάφορες ηλεκτρικές, μηχανικές και χημικές δοκιμές που εφαρμόζονται σε συνθετικούς μονωτήρες, παρουσιάζεται στο δεύτερο κεφάλαιο. Επίσης, περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθείται σε αυτές τις δοκιμές σύμφωνα με τα διεθνή Πρότυπα (αν υπάρχουν) ή σύμφωνα με διάφορες ερευνητικές μελέτες (αν η δοκιμή βρίσκεται σε ερευνητικό στάδιο). Οι δοκιμές αυτές περιλαμβάνουν: δοκιμές στο υλικό του μονωτικού περιβλήματος και της ράβδου των συνθετικών μονωτήρων, αλλά και δοκιμές που αφορούν την αντοχή των συνθετικών μονωτήρων σε μηχανικά φορτία.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικοί πίνακες με τους συνθετικούς μονωτήρες μέσης τάσης (καινούριους και μεταχειρισμένους – αποξηλωμένους) που συγκεντρώθηκαν και στους οποίους πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές. Οι καινούριοι μονωτήρες λήφθηκαν δειγματοληπτικά από το τμήμα προμηθειών του διαχειριστή του ελληνικού συστήματος διανομής (ΔΕΔΔΗΕ) και οι μεταχειρισμένοι λήφθηκαν έπειτα από αποξήλωση τους από διάφορες τοποθεσίες από το ελληνικό ηλεκτρικό δίκτυο διανομής. Οι μετρήσεις και δοκιμές που εκτελέστηκαν, όπως επίσης, και τα μοντέλα προσομοιώσεων με λογισμικό πεδιακής ανάλυσης, αλλά και το μοντέλο τεχνητής νοημοσύνης (νευρωνικό δίκτυο) που

αναπτύχθηκαν για κάποιες από τις δοκιμές περιγράφονται και αναλύονται στο ίδιο κεφάλαιο. Επιπλέον, παρατίθενται, αναλύονται και επεξηγούνται τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών - μετρήσεων, τα αποτελέσματα των πεδιακών προσομοιώσεων και του νευρωνικού δικτύου. Επιπλέον, παρουσιάζονται διάφορες νέες μεθοδολογίες (για δοκιμές που βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο και δεν υπάρχουν σε διεθνή Πρότυπα) και προτάσεις τροποποιήσεων επί των ήδη υπαρχόντων μεθοδολογιών των διεθνών Προτύπων των δοκιμών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται η συμβολή και τα στοιχεία επιστημονικής πρωτοτυπίας της διατριβής στα θέματα που άπτονται των δοκιμών και μετρήσεων ελέγχου της ποιότητας και της αξιοπιστίας των συνθετικών μονωτήρων. Τέλος, παρατίθενται κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα στα πεδία που πραγματεύεται η συγκεκριμένη διατριβή.

Κεφάλαιο 1. Γενικά στοιχεία συνθετικών μονωτήρων

1.1 Ιστορική αναδρομή

Στη σημερινή εποχή οι συνθετικοί μονωτήρες χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο από τους διαχειριστές των δικτύων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως αντικαθιστώντας τους παλαιότερους μονωτήρες άλλων υλικών (κεραμικούς, γυάλινους κλπ.) [1].

Οι πρώτες προσπάθειες κατασκευής μονωτήρων, οι οποίοι θα κατασκευάζονταν από οργανικά και όχι ανόργανα υλικά έγιναν κατά τη διάρκεια των δεκαετιών 1930 και 1940. Το πρώτο πολυμερές που χρησιμοποιήθηκε εμπορικά για την κατασκευή αυτών των συνθετικών μονωτήρων ήταν οι εποξικές ρητίνες διφαινόλης στα μέσα της δεκαετίας του 1940. Στη συνέχεια, το 1957 χρησιμοποιήθηκαν οι κυκλοαλειφατικές εποξικές ρητίνες, οι οποίες ήταν καλύτερες σε σχέση με τις εποξικές ρητίνες διφαινόλης λόγω της μεγαλύτερης αντοχής τους στη διάβρωση και στο σχηματισμό αγωγίμων οδεύσεων άνθρακα επάνω στο υλικό. Αυτή η συμπεριφορά επετεύχθη και με τη χρήση πληρωτικού τριένυδρης αλουμίνας (alumina trihydrate filler) μέσα στο μονωτικό υλικό. Ωστόσο, αυτοί οι πρώτοι συνθετικοί μονωτήρες είχαν πολύ σοβαρά προβλήματα όσον αφορά την αντοχή τους στις καιρικές συνθήκες και γι' αυτό το λόγο κρίθηκαν ακατάλληλοι για εξωτερική χρήση [2, 3].

Η τεχνολογία των συνθετικών μονωτήρων δεν είχε ληφθεί σοβαρά υπόψιν μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1970, κατά την οποία αναπτύχθηκαν κάποια νέα μονωτικά υλικά για συνθετικούς μονωτήρες τα οποία είχαν πολύ καλύτερες ιδιότητες από τα προηγούμενα, καθώς επίσης έγινε μεγάλη πρόοδος και στην τεχνολογία των υλικών που ήταν ενισχυμένα με ίνες (fibre reinforced materials), τα οποία αποτελούσαν το βασικό δομικό στοιχείο των συνθετικών μονωτήρων. Παραδείγματα τέτοιων νέων μονωτικών υλικών ήταν: το καουτσούκ αιθυλενίου προπυλενίου (ethylene propylene rubber - EPR), το μονομερές αιθυλενίου προπυλενίου διενίου (ethylene propylene diene monomer - EPDM), το οξικό αιθυλένιο βινύλιο (ethylene vinyl acetate - EVA), το πολυτετραφθοροαιθυλένιο (polytetrafluoroethylene - PTFE) και το καουτσούκ σιλίκονης (silicone rubber - SR), ενώ παράδειγμα υλικού που χρησιμοποιήθηκε για τον πυρήνα των συνθετικών μονωτήρων ήταν το πλαστικό ενισχυμένο με ίνες (fiber - reinforced plastic - FRP), οι γυάλινες ίνες εποξικής ρητίνης (epoxy resin fiberglass) και οι γυάλινες ίνες ανθεκτικές στη διάβρωση (Corrosion - resistant glass fibre E-CR or ECR-Glass) [2, 3, 4, 5].

Τελικά, η εξέλιξη αυτή στα υλικά κατασκευής των συνθετικών μονωτήρων οδήγησε στην ευρεία αποδοχή τους παγκοσμίως ακόμη και από εκείνους που ήταν αρχικά σκεπτικοί. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι, στα τέλη του 1990 οι συνθετικοί μονωτήρες στήριξης κατείχαν περίπου το 75% της αγοράς μονωτήρων στήριξης στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής [2, 4].

1.2 Πλεονεκτήματα συνθετικών μονωτήρων

Η ευρεία αποδοχή των συνθετικών μονωτήρων από όλους τους διαχειριστές συστημάτων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας έγκειται στα πολλά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει αυτή η τεχνολογία μονωτήρων. Κάποια πλεονεκτήματα των συνθετικών μονωτήρων παρουσιάζονται παρακάτω:

- Η βελτίωση της ηλεκτρικής και της μηχανικής απόδοσης των συνθετικών μονωτήρων μπορεί να γίνει μεμονωμένα κατά την επιλογή των υλικών από τα οποία αυτοί αποτελούνται, ενώ στους συμβατικούς μονωτήρες (πορσελάνης ή γυαλιού) η ξεχωριστή βελτιστοποίηση των μηχανικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων δεν είναι δυνατή [4].
- Μικρό βάρος, λόγω της μικρής πυκνότητας των πολυμερών υλικών [6 - 12]. Αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι στις περιπτώσεις των γραμμών υψηλής τάσης, το βάρος των συμβατικών μονωτήρων (πορσελάνης, γυαλιού κλπ.) ισούται με το 20% του συνολικού κατακόρυφου βάρους του μεταλλικού πυλώνα της γραμμής. Αντίθετα, με τη χρήση συνθετικών μονωτήρων υπάρχει μείωση του βάρους μέχρι και περισσότερο από 90% σε σχέση με τους συμβατικούς μονωτήρες [4].
- Μεγάλη ευκολία μεταφοράς, εγκατάστασης και συντήρησης, λόγω του μικρού βάρους [6, 7, 8, 10, 12].
- Χαμηλό κόστος μεταφοράς και συντήρησης [12].
- Μειωμένες απαιτήσεις συντήρησης και περιοδικών πλυσιμάτων [9, 12].
- Μειωμένο έως και μηδενικό ρίσκο έκρηξης και διασκόρπισης κομματιών των μονωτήρων αυτών σε περίπτωση εσωτερικού σφάλματος λόγω των φυσικών ιδιοτήτων των πολυμερών τα οποία δε θρυμματίζονται, όπως για παράδειγμα συμβαίνει με την πορσελάνη [6, 7].
- Αυξημένη υδροφοβικότητα [6, 10, 12].
- Πολύ καλή απόδοση σε περιβάλλοντα με μεγάλη ρύπανση [6, 8, 10, 11, 12].
- Υψηλή μηχανική αντοχή [4, 10, 11].

- Λόγω του λεπτού σχεδιασμού τους αποτελούν δύσκολο στόχο σε περιπτώσεις βανδαλισμού με όπλα, το οποίο είναι σημαντικό για χώρες εκτός Ευρώπης [4]. Ακόμη ένα περίεργο αλλά αξιοσημείωτο παράδειγμα βανδαλισμού μονωτήρων έχει σημειωθεί σε γήπεδο γκολφ κοντά στην περιοχή της Ζυρίχης στην Ελβετία, όπου οι πορσελάνινοι μονωτήρες που χρησιμοποιούνταν, αντικαταστάθηκαν από συνθετικούς επειδή έσπαγαν από τα μπαλάκια του γκολφ λόγω άστοχων σουτ από τους παίκτες [18].
- Αυξημένη αντίσταση στην υπερπήδηση (flashover), λόγω της υψηλής υδροφοβικότητας τους και του σχεδιασμού τους [6, 7, 9].
- Καλύτερη οπτική αισθητική των γραμμών μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας [6].

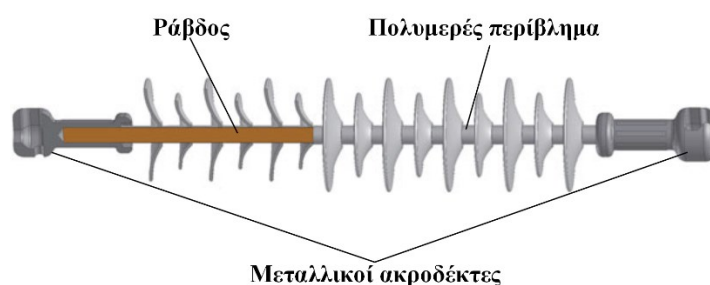
1.3 Βασικά δομικά στοιχεία των συνθετικών μονωτήρων

Οι συνθετικοί μονωτήρες μπορούν να κατασκευαστούν σαν συνθετικοί μονωτήρες στερεού πυρήνα (solid core insulators) ή σαν συνθετικοί μονωτήρες κοίλου πυρήνα (hollow core insulators). Τα βασικά δομικά στοιχεία ενός συνθετικού μονωτήρα είναι τρία, όπως φαίνεται στο σχήμα 1-1 για συνθετικό μονωτήρα στερεού πυρήνα και στο σχήμα 1-2 για συνθετικό μονωτήρα κοίλου πυρήνα:

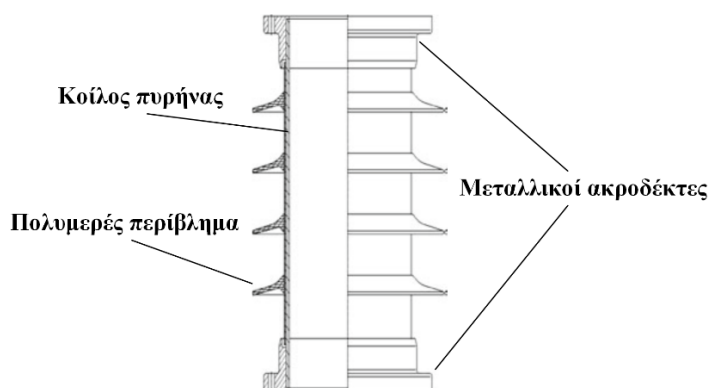
- **Ράβδος (στερεός πυρήνας) και Κοίλος πυρήνας.** Η ράβδος και ο κοίλος πυρήνας είναι στοιχεία μεγάλης μηχανικής αντοχής και αποτελούν το συστατικό των συνθετικών μονωτήρων που είναι υπεύθυνο για την αντοχή τους σε εξωτερικά μηχανικά φορτία. Επιπλέον, η ράβδος και ο κοίλος πυρήνας αποτελούν τα κύρια συστατικά μόνωσης στους συνθετικούς μονωτήρες. Οι διαφορές τους έγκεινται στα διαφορετικά πεδία εφαρμογής όπου χρησιμοποιούνται οι μονωτήρες στερεού πυρήνα σε σχέση με αυτούς κοίλου πυρήνα (γίνεται αναφορά σε επόμενο υποκεφάλαιο). Ακόμη μία διαφορά είναι ότι οι ράβδοι (ή στερεοί πυρήνες) είναι συμπαγή στοιχεία (μασίφ) στο εσωτερικό τους, ενώ οι κοίλοι πυρήνες είναι κούφιοι στο εσωτερικό τους σαν σωλήνες. Ως εκ τούτου, ακολουθείται διαφορετική κατασκευαστική διαδικασία για τις ράβδους (στερεούς πυρήνες) και διαφορετική για τους κοίλους πυρήνες (γίνεται αναφορά σε επόμενο υποκεφάλαιο).
- **Πολυμερές περίβλημα.** Το πολυμερές αυτό περιβάλλει τον πυρήνα (στερεό ή κοίλο) σχηματίζοντας τα κύαθια (δίσκους) του συνθετικού μονωτήρα και είναι υπεύθυνο για τα χαρακτηριστικά ηλεκτρικής μόνωσης του συνθετικού μονωτήρα, όπως για

παράδειγμα την αντοχή στην υπερπήδηση (flashover) και τον καθορισμό του μήκους ερπυσμού του μονωτήρα. Επίσης, μια άλλη λειτουργία του περιβλήματος αυτού είναι να προστατεύει τον εκάστοτε πυρήνα από τις καιρικές συνθήκες και την υγρασία.

- **Μεταλλικοί ακροδέκτες.** Οι μεταλλικοί ακροδέκτες βρίσκονται στις δύο άκρες του συνθετικού μονωτήρα και ο ρόλος τους σχετίζεται με τη μετάδοση των μηχανικών φορτίων. Χρησιμοποιείται διαφορετικός τρόπος σύνδεσης των μεταλλικών ακροδεκτών σε ένα συνθετικό μονωτήρα στερεού πυρήνα σε σχέση με έναν μονωτήρα κοίλου πυρήνα.



Σχήμα 1-1. Δομικά στοιχεία ενός τυπικού συνθετικού μονωτήρα στερεού πυρήνα [4].



Σχήμα 1-2. Δομικά στοιχεία ενός τυπικού συνθετικού μονωτήρα κοίλου πυρήνα [4].

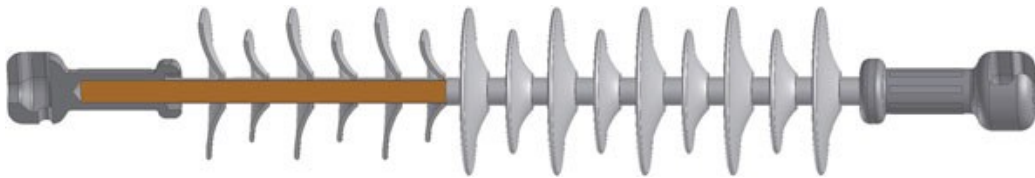
Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, σε έναν συνθετικό μονωτήρα έχει πολύ μεγάλη σημασία η τελειοποίηση των σημείων στα οποία συνδέονται μεταξύ τους τα τρία βασικά δομικά στοιχεία του καθώς, κυρίως, σε αυτά τα σημεία εντοπίζονται τα διάφορα ηλεκτρικά και μηχανικά σφάλματα κατά τη λειτουργία και χρήση αυτών των μονωτήρων στα ηλεκτρικά δίκτυα [4, 12].

1.4 Τύποι συνθετικών μονωτήρων και χρήσεις αυτών

1.4.1 Συνθετικοί μονωτήρες μακράς ράβδου (long rod)

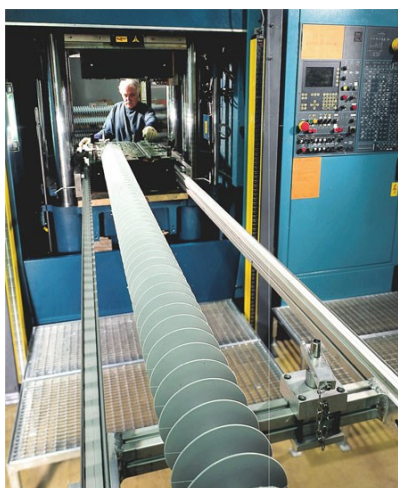
Ο όρος “long rod” χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά για μια ιδιαίτερη κατασκευή μονωτήρα πορσελάνης που αρχικά χρησιμοποιήθηκε τη δεκαετία του 1920 στη Γερμανία σαν εναλλακτική των κεραμικών μονωτήρων τύπου “cap-and-pin”. Με την εξέλιξη τους οι συνθετικοί μονωτήρες μακράς ράβδου σε πολλές χώρες αντικατέστησαν τους μονωτήρες “cap-and-pin”, ενώ είναι επίσης γνωστοί και ως μονωτήρες ανάρτησης (suspension insulators) [4, 14].

Στο σχήμα 1-3 φαίνεται ένας τυπικός συνθετικός μονωτήρας μακράς ράβδου, καθώς επίσης και τα δομικά μέρη του, τα οποία είναι: η ράβδος ή πυρήνας, οι μεταλλικοί ακροδέκτες και το πολυμερές περίβλημα.

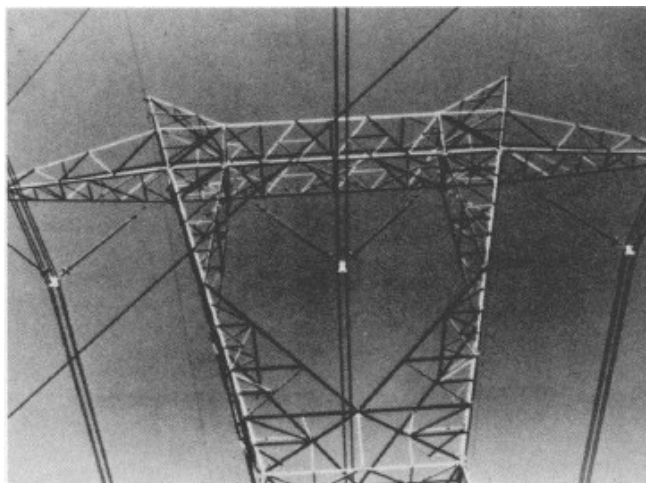


Σχήμα 1-3. Τυπικός συνθετικός μονωτήρας μακράς ράβδου [4].

Το βασικό πλεονέκτημα των συνθετικών μονωτήρων μακράς ράβδου πηγάζει από το υλικό κατασκευής της ράβδου, ενισχυμένο με ίνες (συνήθως γυαλιού) πλαστικό (FRP: Fiber reinforced plastic). Χαρακτηριστικό αυτού του υλικού είναι ότι μπορεί να παραχθεί μονοκόμματο (ένα κομμάτι) σε πολύ μεγάλα μήκη μέχρι και 20 m, κάτι το οποίο δε μπορεί να γίνει με τους συμβατικούς μονωτήρες, όπως οι μονωτήρες πορσελάνης ή γυαλιού. Στους συμβατικούς μονωτήρες για να κατασκευαστεί ένας μονωτήρας πολύ μεγάλου μήκους θα πρέπει να ενωθούν πολλά κομμάτια τους μεταξύ τους, ενώ στους συνθετικούς μονωτήρες χρησιμοποιείται ένα ή το πολύ δύο κομμάτια συνδεδεμένα [4, 15]. Οι συνθετικοί μονωτήρες μακράς ράβδου παράγονται σήμερα σε μεγέθη: 10-100 cm για εφαρμογές χαμηλής και μέσης τάσης και μέχρι πάνω από 10 m για συστήματα υπερυψηλής τάσης. Στο σχήμα 1-4 α, φαίνεται ένας συνθετικός μονωτήρας μακράς ράβδου μήκους 6 m κατά την κατασκευή του και στο σχήμα 1-4 β φαίνονται μονοκόμματα (αποτελούμενοι από ένα μόνο τμήμα) συνθετικοί μονωτήρες μακράς ράβδου με πολυμερές περίβλημα από silicone rubber που χρησιμοποιούνται σε μια γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας 735 kV.



α



β

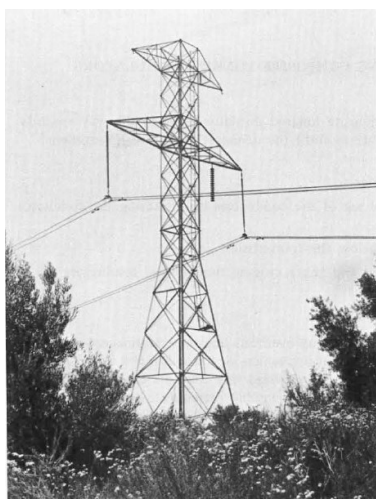
Σχήμα 1-4. α) Συνθετικός μονωτήρας μακράς ράβδου μήκους 6 m κατά τη διαδικασία κατασκευής του [4], β) συνθετικοί μονωτήρες μακράς ράβδου με silicone rubber για πολυμερές υλικό που χρησιμοποιούνται σε γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας 735 kV [14].

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό των συνθετικών μονωτήρων μακράς ράβδου που τους κάνει πολύ δημοφιλείς ακόμα και σε πολύ υψηλές τάσεις είναι το πολύ μικρότερο βάρος τους συγκριτικά με τους συμβατικούς μονωτήρες, όπως οι μονωτήρες πορσελάνης και γυαλιού [16]. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι η χρήση συνθετικών μονωτήρων μακράς ράβδου οδηγεί σε μείωση βάρους 5 – 20 φορές σε σχέση με τη χρήση μονωτήρων συμβατικών υλικών [4, 15].

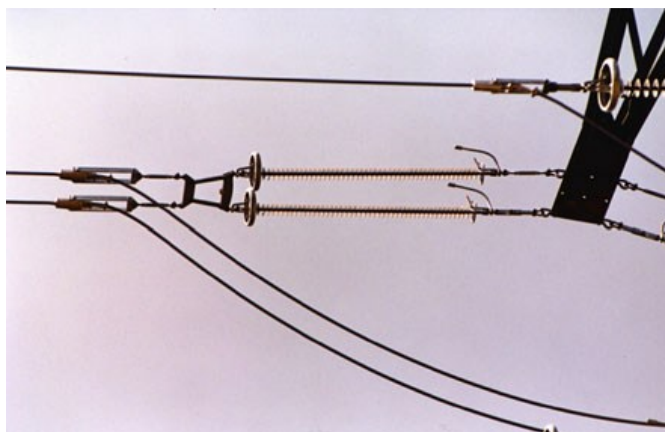
Οι συνθετικοί μονωτήρες μακράς ράβδου χρησιμοποιούνται κυρίως σαν μονωτήρες ανάρτησης που αναρτούν μια γραμμή και τοποθετούνται σε κατακόρυφη διάταξη ως προς το έδαφος (σχήμα 1-5 α), είτε που τερματίζουν μια γραμμή και τοποθετούνται σε οριζόντια διάταξη ως προς το έδαφος (σχήμα 1-5 β).

Οι συνθετικοί μονωτήρες μακράς ράβδου χρησιμοποιούνται επίσης στις γέφυρες ηλεκτρικής συνέχειας (jumpers) ή στις πύλες (portals) εξωτερικών υποσταθμών και σε ορισμένες περιπτώσεις στους αγωγούς αντιστήριξης (επίτονα) των ξύλινων στύλων και σπανιότερα στα επίτονα μεταλλικών πυλώνων [4].

Χρησιμοποιούνται επίσης σε διατάξεις βραχίονα (cross-arms) σε γραμμές μεταφοράς ακόμα και πάνω από 400 kV (σχήμα 1-6 α), καθώς επίσης και σε ειδικές κατασκευές πυλώνων, όπως οι “guyed cross-rope suspension (chainette)” (σχήμα 1-6 β). Τέλος, λόγω της πολύ καλής συμπεριφοράς των συνθετικών μονωτήρων μακράς ράβδου έχουν αρχίσει και χρησιμοποιούνται και στις γραμμές τροφοδοσίας σιδηροδρόμων.

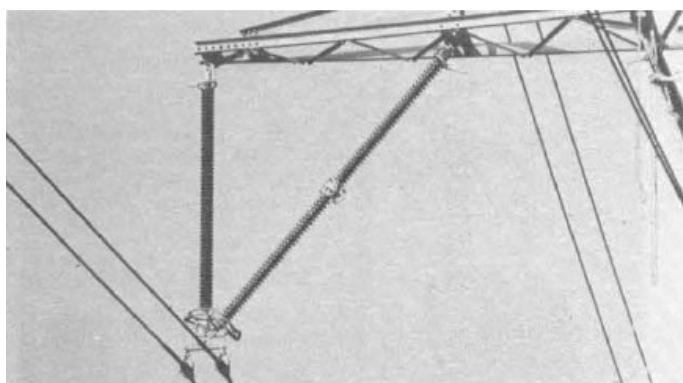


α



β

Σχήμα 1-5. α) Συνθετικοί μονωτήρες μακράς ράβδου τοποθετημένοι κατακόρυφα σε μια γραμμή 400 kV στις Η.Π.Α. [15], β) συνθετικοί μονωτήρες μακράς ράβδου τοποθετημένοι οριζόντια [4].



α



β

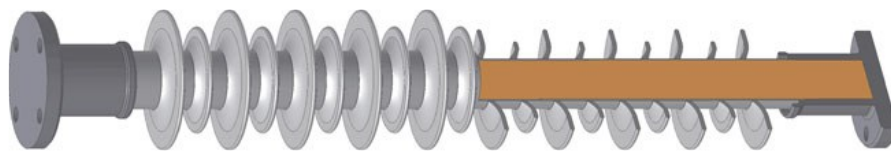
Σχήμα 1-6. α) Συνθετικοί μονωτήρες μακράς ράβδου σε διάταξη “cross-arm ασύμμετρο V-string” σε γραμμή 420 kV [17], β) συνθετικοί μονωτήρες μακράς ράβδου σε πυλώνα “chainette”.

1.4.2 Συνθετικοί μονωτήρες στήριξης (post)

Σε αντίθεση με τους συνθετικούς μονωτήρες μακράς ράβδου ή μονωτήρες ανάρτησης οι οποίοι δέχονται μόνο φορτία εφελκυσμού (tensile loads), οι συνθετικοί μονωτήρες στήριξης δέχονται κυρίως φορτία τα οποία δρουν κάθετα στο διαμήκη άξονα του μονωτήρα και ονομάζονται φορτία κάμψης (bending ή cantilever loads), αλλά και φορτία συμπίεσης (compression loads) και εφελκυσμού [4, 19]. Τα φορτία κάμψης δημιουργούνται κυρίως λόγω του βάρους των διατάξεων που στηρίζουν αυτοί οι μονωτήρες (όπως π.χ. οι αγωγοί σε γραμμές κυρίως μέσης τάσης), αλλά μερικές φορές εμφανίζονται και λόγω δυνάμεων που δημιουργούνται κατά μήκος του αγωγού της γραμμής διανομής. Τα φορτία εφελκυσμού και τα φορτία θλίψης σε αυτούς τους μονωτήρες δημιουργούνται κυρίως λόγω της επίδρασης του αέρα στους αγωγούς των γραμμών που υποστηρίζουν αυτοί οι μονωτήρες [19]. Οπότε, κατά τη σχεδίαση συνθετικών μονωτήρων στήριξης θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν οι μηχανικές δυνάμεις

που μελλοντικά θα τους ασκούνται κατά τη λειτουργία τους στο δίκτυο ή στη διάταξη που θα εγκατασταθούν, καθώς επίσης και η μέγιστη επιτρεπτή παραμόρφωση (deflection) που θα μπορούν να αντέξουν λόγω των δυνάμεων κάμψης [20]. Οι αυξημένες αυτές απαιτήσεις αντοχής των συνθετικών μονωτήρων στήριξης σε μηχανικές δυνάμεις έχουν οδηγήσει στο να κατασκευάζονται με αρκετά μεγαλύτερη διάμετρο ράβδου σε σχέση με τους συνθετικούς μονωτήρες μακράς ράβδου. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι μια διάμετρος ράβδου από FRP της τάξης των 32 mm είναι σχεδόν πάντα επαρκής για τους συνθετικούς μονωτήρες μακράς ράβδου, ενώ οι συνθετικοί μονωτήρες στήριξης απαιτείται να έχουν διάμετρο ράβδου μέχρι και 150 mm σε κάποιες εφαρμογές [4].

Στο σχήμα 1-7 φαίνεται ένας τυπικός συνθετικός μονωτήρας στήριξης, καθώς επίσης και τα δομικά μέρη του, τα οποία είναι: η ράβδος ή πυρήνας, οι μεταλλικοί ακροδέκτες και το πολυμερές περίβλημα.

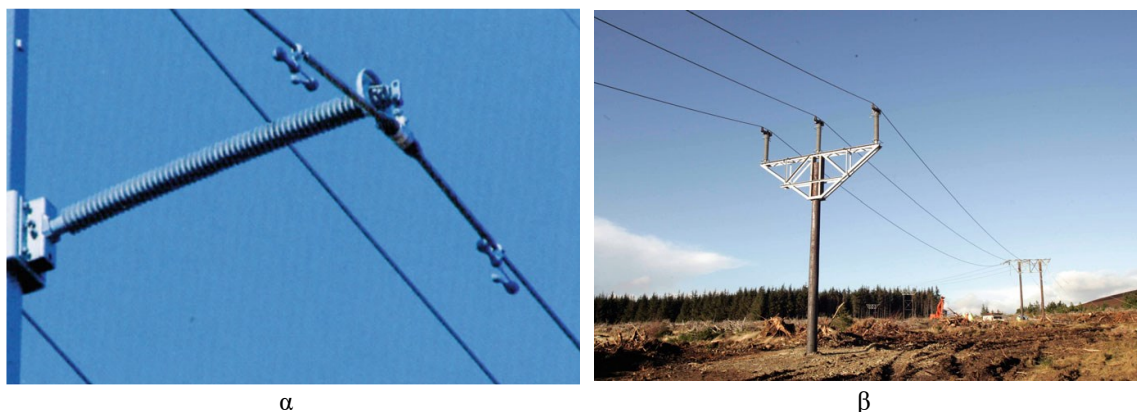


Σχήμα 1-7. Τυπικός συνθετικός μονωτήρας στήριξης [4].

Οι συνθετικοί μονωτήρες στήριξης σήμερα χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως αντικαθιστώντας τους συμβατικούς μονωτήρες που αποτελούνται από άλλα υλικά, όπως η πορσελάνη και το γυαλί. Αυτό συμβαίνει λόγω των πλεονεκτημάτων που εμφανίζουν οι συνθετικοί μονωτήρες και έχουν ήδη αναφερθεί στο υποκεφάλαιο 1.2, αλλά και λόγω ενός σημαντικού χαρακτηριστικού των συνθετικών μονωτήρων στήριξης. Το βασικό δομικό στοιχείο αυτών των μονωτήρων, η ράβδος, δεν είναι εύθραυστη (non brittle) λόγω του τρόπου κατασκευής της, πράγμα που σημαίνει ότι σε περίπτωση μηχανικής αστοχίας είναι εξαιρετικά απίθανο να αποκοπεί ένας τέτοιος μονωτήρας από το στύλο ή τη διάταξη που είναι τοποθετημένος και να οδηγήσει στην πτώση του αγωγού ή της διάταξης που υποστηρίζει στο έδαφος και άρα σε μόνιμο βραχυκύκλωμα [21].

Ιστορικά, οι πρώτοι συνθετικοί μονωτήρες στήριξης χρησιμοποιήθηκαν σε συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι 35 kV. Επομένως, αυτοί οι μονωτήρες χρησιμοποιούνται ευρέως στα συστήματα διανομής σαν στηρίγματα των αγωγών μέσης τάσης. Επίσης, χρησιμοποιούνται σε συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας πάνω

από 69 kV σε οριζόντια ή κατακόρυφη διάταξη. Στο σχήμα 1-8 φαίνονται συνθετικοί μονωτήρες στήριξης σε οριζόντια και σε κατακόρυφη διάταξη σε συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [4].



Σχήμα 1-8. α) Συνθετικός μονωτήρας στήριξης 230 kV σε οριζόντια διάταξη, β) συνθετικοί μονωτήρες στήριξης 132 kV σε πυλώνες τύπου «τρίαινα» στη Σκωτία [4].

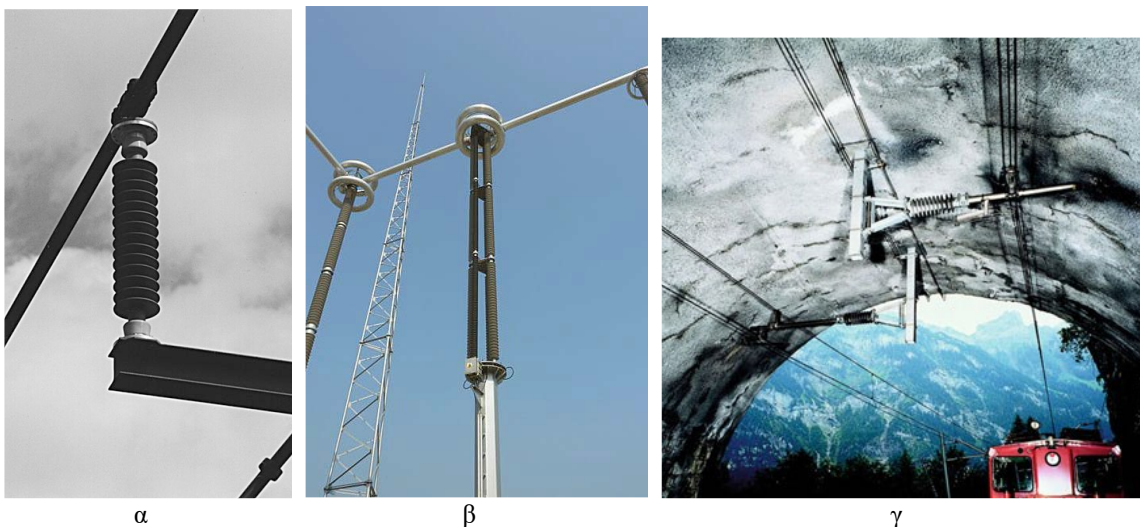
Χρησιμοποιούνται επίσης σε διατάξεις βραχίονα (cross-arm) σε γραμμές μεταφοράς μεγαλύτερες των 220 kV, όπου οι μηχανικές δυνάμεις είναι τόσο μεγάλες που δε μπορεί να τις αντέξει ένας συνθετικός μονωτήρας στήριξης μόνος του. Έτσι τοποθετείται ένας συνθετικός μονωτήρας στήριξης οριζόντια και υποστηρίζεται από ένα μονωτήρα ανάρτησης σχηματίζοντας ένα πλάγιο “V”, δηλαδή ένα σταυρωτό βραχίονα (cross arm), όπως φαίνεται στο σχήμα 1-9 [4, 18, 19].



Σχήμα 1-9. Συνθετικοί μονωτήρες στήριξης τοποθετημένοι οριζόντια σε διάταξη σταυρωτού βραχίονα (cross-arm) [4].

Άλλο ένα πεδίο χρήσης των συνθετικών μονωτήρων στήριξης είναι σε υπαίθριους υποσταθμούς για τη στήριξη των ζυγών (bus bars) των υποσταθμών [4, 18, 20], όπως φαίνεται στο σχήμα 1-10. Ακόμη, χρησιμοποιούνται σαν μονωτήρες διάφορων συσκευών (π.χ. πηνία συντονισμού), σαν μονωτήρες στήριξης για τερματισμούς καλωδίων, διακοπών και άλλων βοηθητικών μετρητικών εξοπλισμών [4, 20]. Επίσης, το 2010

χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά συνθετικοί μονωτήρες στήριξης σε μια κατασκευή τριών στύλων (στηριγμάτων) ύψους 10 μέτρων 800 kV DC (σχήμα 1-10) [20]. Ακόμη, συνθετικοί μονωτήρες στήριξης χρησιμοποιούνται για χρόνια σε κατασκευές σιδηροδρόμων, όπως η σιδηροδρομική σήραγγα BLS (Bern-Lotschberg-Simplon) στην Ελβετία (σχήμα 1-10), όπου χρησιμοποιήθηκαν για να αποφευχθεί το κόστος και η πολυπλοκότητα καθαρισμού των πορσελάνινων μονωτήρων που χρησιμοποιούνταν μέχρι τότε μέσα στη σήραγγα. Αναφέρεται ότι στο συγκεκριμένο τούνελ εγκαταστάθηκαν 4000 συνθετικοί μονωτήρες στήριξης και παρόλο που σταμάτησε το πλύσιμο τους κανένας από αυτούς δεν προκάλεσε ποτέ σφάλμα [18].



Σχήμα 1-10. α) Συνθετικός μονωτήρας στήριξης bus bar 123 kV [18], β) 800 kV DC κατασκευή τριών ποδιών ύψους 10 μέτρων από συνθετικούς μονωτήρες στήριξης [20], γ) 15 kV συνθετικοί μονωτήρες στήριξης στη σιδηροδρομική σήραγγα Lotschberg [4].

1.4.3 Συνθετικοί μονωτήρες κοίλου πυρήνα (hollow core)

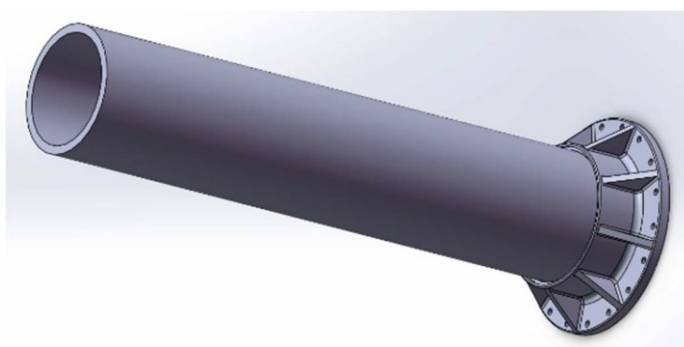
Η τελευταία πολύ σημαντική και ευρέως χρησιμοποιούμενη κατηγορία συνθετικών μονωτήρων είναι οι συνθετικοί μονωτήρες κοίλου πυρήνα. Η κατασκευή τους διαφέρει αρκετά σε σχέση με τους δύο προηγούμενους τύπους συνθετικών μονωτήρων. Οι συνθετικοί μονωτήρες κοίλου πυρήνα αποτελούνται από τους μεταλλικούς ακροδέκτες, τη ράβδο, από πλαστικό ενισχυμένο με υαλονήματα και το εξωτερικό περίβλημα που συνηθίζεται πλέον να είναι από σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber). Η μεγάλη κατασκευαστική διαφορά αυτών των μονωτήρων σε σχέση με τους προηγούμενους τύπους είναι ότι η ράβδος τους έχει κυλινδρική μορφή και είναι κούφια στο εσωτερικό της (σαν σωλήνας). Επίσης, για την κατασκευή αυτού του τύπου ράβδων ακολουθείται διαφορετική κατασκευαστική διαδικασία από τους δύο προηγούμενους τύπους. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι, οι τυπικές διάμετροι των ράβδων των συνθετικών μονωτήρων κοίλου

πυρήνα ξεκινούν από τα 50 mm και φτάνουν μέχρι και τα 600 mm, ενώ δεν είναι σπάνιες και οι περιπτώσεις που έχει χρειαστεί η διάμετρος να φτάσει και τα 800 mm και περισσότερο για ειδικές κατασκευές [4].

Στο σχήμα 1-11 παρουσιάζεται ένας τυπικός μονωτήρας κοίλου πυρήνα, καθώς επίσης και μία τομή του, στην οποία φαίνεται το κούφιο εσωτερικό του.



α



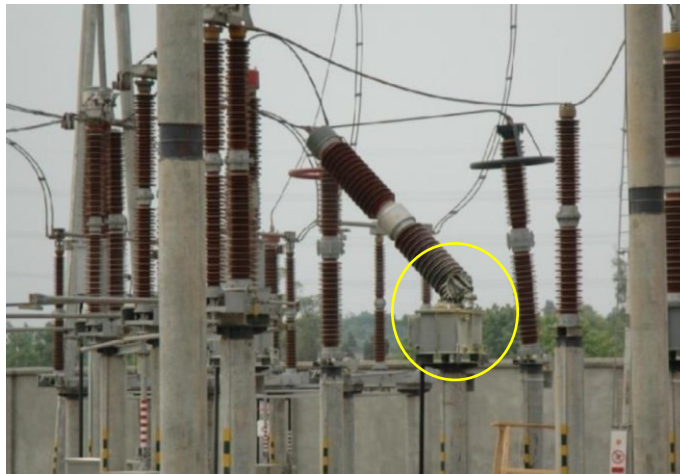
β

Σχήμα 1-11. α) Τυπικός συνθετικός μονωτήρας κοίλου πυρήνα [22], β) τομή του πυρήνα ενός συνθετικού μονωτήρα κοίλου πυρήνα[23].

Οι συγκεκριμένοι μονωτήρες είναι κατασκευασμένοι να αντέχουν σε ποικίλα μεγάλα φορτία, κάτι το οποίο απαιτείται από τις συνθήκες και τις εφαρμογές που χρησιμοποιούνται. Τα φορτία τα οποία αντέχουν είναι κυρίως κάμψης και θλίψης, σε συνδυασμό με φορτία εφελκυσμού. Επίσης, είναι κατασκευασμένοι να αντέχουν φορτία τα οποία προκαλούνται από εσωτερική πίεση, που προκύπτει από τη χρήση τους σε εφαρμογές με ηλεκτρολογικό εξοπλισμό που πρέπει να βρίσκεται μέσα σε μονωτικό αέριο υπό πίεση, όπως είναι το SF₆ [24, 25, 26].

Οι συνθετικοί μονωτήρες κοίλου πυρήνα παρουσιάζουν εκ κατασκευής μια σειρά πλεονεκτημάτων σε σχέση με τους μονωτήρες πορσελάνης που χρησιμοποιούνταν στις ίδιες εφαρμογές. Αρχικά, είναι κατασκευασμένοι ώστε να έχουν μεγάλη αντοχή στην έκρηξη, η οποία μπορεί να συμβεί σε περίπτωση αστοχίας του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού

που έχουν μέσα τους, όπως είναι οι διακόπτες ισχύος μέσα σε αέριο SF₆ υπό πίεση. Σε περίπτωση έκρηξης λόγω αστοχίας, σε αυτούς τους μονωτήρες δεν εκτοξεύονται κομμάτια και κατά συνέπεια είναι πρακτικά ακίνδunami για τους ανθρώπους που εργάζονται κοντά στους χώρους που είναι εγκατεστημένοι, αλλά και για τον υπόλοιπο εξοπλισμό που βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από αυτούς [4, 23, 24]. Επιπλέον, άλλο ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα τους είναι ότι έχουν πολύ καλή συμπεριφορά και δεν καταστρέφονται σε περίπτωση σεισμού, κάτι που δεν ισχύει για τους πορσελάνινους, όπως φαίνεται στο σχήμα 1-12 [22, 23, 25, 26, 27].



Σχήμα 1-12. Αστοχία στη βάση ενός πορσελάνινου μονωτήρα κούλου πυρήνα (μετασηματιστής τάσεως), εγκατεστημένου σε υποσταθμό, μετά από σεισμό το 2008 [22].

Οι συνθετικοί μονωτήρες του συγκεκριμένου τύπου εντοπίζονται σε σημεία του δικτύου, όπου απαιτείται να υπάρχει ηλεκτρολογικός εξοπλισμός, κυρίως υψηλής τάσης, στο εσωτερικό τους [27]. Κύριο πεδίο εκτεταμένης χρήσης αυτών των μονωτήρων είναι σε υπαίθριους υποσταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας, όπου απαιτείται μεγάλη αξιοπιστία στον εξοπλισμό, την οποία προσφέρουν αυτοί οι μονωτήρες λόγω των πολύ καλών μηχανικών ιδιοτήτων τους, αλλά και της πολύ καλής απόδοσης τους σε συνθήκες αυξημένης ρύπανσης. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται σαν μονωτήρες διέλευσης (bushings) όπου αυτό είναι απαραίτητο, όπως π.χ. σε μετασηματιστές (σχήμα 1-13) και σε τοίχους, μέσω των οποίων απαιτείται να διέλθει υψηλή τάση. Επίσης, χρησιμοποιούνται σε διατάξεις προστασίας του εξοπλισμού από υπερτάσεις (surge arresters), στις οποίες αξιοποιείται στο έπακρο η ιδιότητα των μονωτήρων αυτών να παρέχουν προστασία στην περίπτωση έκρηξης λόγω υπερφόρτισης. Επιπλέον χρησιμοποιούνται σε διακόπτες ισχύος (circuit breakers) (σχήμα 1-13), μετασηματιστές έντασης (σχήμα 1-13) και τάσης (current

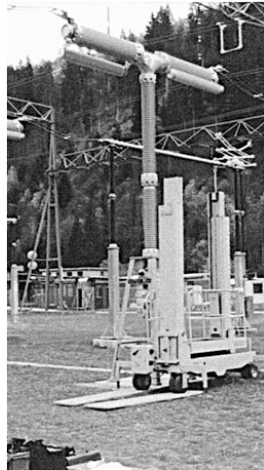
and voltage transformers) και σαν τερματισμοί καλωδίων (cable terminations) [4, 18, 22, 24, 27, 28].



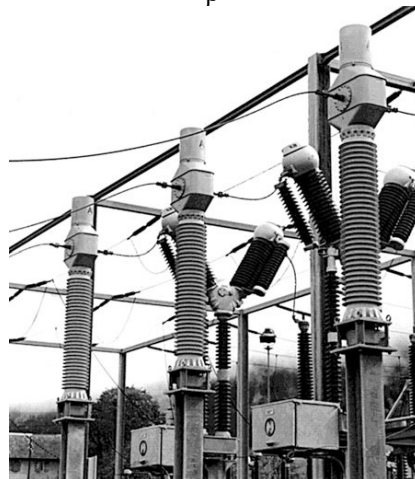
α



β



γ



δ

Σχήμα 1-13. α) Συνθετικοί μονωτήρες κοίλου πυρήνα σαν μονωτήρες διέλευσης σε μετασχηματιστή 420/220 kV, β) συνθετικοί μονωτήρες κοίλου πυρήνα σαν μονωτήρες διέλευσης σε τοίχο γ) διακόπτης ισχύος 420 kV/ 63 kA με συνθετικούς μονωτήρες κοίλου πυρήνα, δ) μετασχηματιστές έντασης με συνθετικούς μονωτήρες κοίλου πυρήνα στα 123 kV [4, 18].

Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση δοκιμών σε συνθετικούς μονωτήρες

Λόγω της εκτεταμένης χρήσης των συνθετικών μονωτήρων στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο, κρίνεται επιτακτική η ανάγκη της ανάπτυξης και εξέλιξης, μέσω της έρευνας, κατάλληλων δοκιμών, ικανών να πληροφορήσουν σωστά για την ποιότητα και την αντοχή των συνθετικών μονωτήρων. Ο έλεγχος της καλής ποιότητας των συνθετικών μονωτήρων μέσω αντιπροσωπευτικών δοκιμών είναι σημαντικός τόσο για τους κατασκευαστές των συνθετικών μονωτήρων (μέσω των δοκιμών σχεδιασμού, τύπου και ρουτίνας), όσο και για τους αγοραστές τους (μέσω των δοκιμών αποδοχής (acceptance tests)). Οι δοκιμές που εφαρμόζονται σε συνθετικούς μονωτήρες μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες: *την οπτική επιθεώρηση, τις δοκιμές της ποιότητας των υλικών του μονωτήρα, τις δοκιμές μηχανικής αντοχής του και τέλος τις δοκιμές διασφάλισης και επιβεβαίωσης των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του*. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο δίνονται ορισμένες βασικές πληροφορίες για κάποιες δοκιμές συνθετικών μονωτήρων που εντάσσονται στις προαναφερθείσες κατηγορίες, καθώς επίσης γίνεται και μια ανασκόπηση στη βιβλιογραφία της κάθε δοκιμής.

2.1 Οπτική επιθεώρηση συνθετικών μονωτήρων

Η οπτική επιθεώρηση των συνθετικών μονωτήρων είναι ο πιο απλός, εύκολος και γρήγορος τρόπος για να αποφανθεί κανείς για την κατάσταση ενός καινούριου ή μεταχειρισμένου συνθετικού μονωτήρα. Επίσης, η οπτική επιθεώρηση αποτελεί τον πιο συνηθισμένο τρόπο επιθεώρησης συνθετικών μονωτήρων. Παρόλα αυτά, για να προκύπτουν σωστά αποτελέσματα από αυτήν την επιθεώρηση, απαιτείται να διεξάγεται από πεπειραμένο επιθεωρητή στο πεδίο των συνθετικών μονωτήρων, ο οποίος είναι πολύ σημαντικό να είναι εξοικειωμένος με το σχεδιασμό, την κατασκευαστική διαδικασία και τα υλικά των συνθετικών μονωτήρων. Επίσης, θα πρέπει να γνωρίζει και να έχει δει στην πράξη τους συνηθέστερους τύπους αστοχίας που συμβαίνουν σε συνθετικούς μονωτήρες [24, 29].

Η οπτική επιθεώρηση μπορεί να γίνει σε καινούριους μονωτήρες, σε μονωτήρες που βρίσκονται εγκατεστημένοι στο δίκτυο, αλλά και σε μονωτήρες οι οποίοι έχουν αποξηλωθεί από το δίκτυο είτε λόγω βλάβης, είτε λόγω προγραμματισμένης

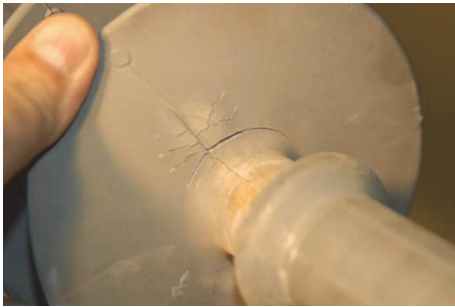
αντικατάστασης τους από το διαχειριστή του ηλεκτρικού δικτύου. Η οπτική επιθεώρηση μπορεί να γίνει τόσο έχοντας τον επιθεωρούμενο μονωτήρα σε κοντινή απόσταση, όσο και απομακρυσμένα από μεγάλη απόσταση. Καλύτερα αποτελέσματα εξασφαλίζονται όταν ο επιθεωρητής βρίσκεται κοντά στο μονωτήρα π.χ. ανεβασμένος επάνω στο μεταλλικό πυλώνα ή στο ξύλινο στύλο, μέσα σε ελικόπτερο που πλησιάζει το μονωτήρα ή μέσα στο καλάθι γερανοφόρου οχήματος. Από την άλλη πλευρά απομακρυσμένη οπτική επιθεώρηση των συνθετικών μονωτήρων μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση κυαλίων και τηλεσκοπίων υψηλής τεχνολογίας. Επιπλέον είναι απαραίτητη η χρήση κάμερας για λήψη φωτογραφιών κατά την οπτική επιθεώρηση, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα για μεταγενέστερη μελέτη, αλλά και για την καταγραφή των σφαλμάτων [24, 30, 31, 32].

Κατά την οπτική επιθεώρηση των συνθετικών μονωτήρων ο επιθεωρητής θα πρέπει να παρατηρήσει διεξοδικά τα εξωτερικά – εμφανή τμήματα του μονωτήρα για ανωμαλίες και σημάδια αστοχίας και βλαβών. Πολλές φορές αυτά τα εξωτερικά σημάδια αποτελούν ισχυρές ενδείξεις για αστοχία του μονωτήρα που προήλθε από το εσωτερικό του [24]. Είναι επίσης σημαντικό ο επιθεωρητής να είναι ικανός να προσδιορίσει τη σοβαρότητα και κρισιμότητα μιας αστοχίας ή ζημιάς που έχει υποστεί ο μονωτήρας, ώστε να γίνουν οι απαραίτητες ενέργειες σε περίπτωση που αυτό χρειάζεται [30]. Τα είδη αστοχίας που μπορούν να παρατηρηθούν κατά την οπτική επιθεώρηση μπορούν να χωριστούν σε:

- φθορές στα κυάθια του μονωτήρα. Τέτοιες είναι: σκισίματα, τρύπες, κομμένα ή κατεστραμμένα κυάθια, σημάδια βανδαλισμού από όπλο, ζημιές που έχουν προκαλέσει πτηνά ή άλλα ζώα, ρύπανση, ρυτίδιασμα ή / και ρωγμές (crazing).
- φθορές στο μονωτικό περίβλημα μεταξύ των κυαθίων. Τέτοιες είναι: εκτεθειμένη ράβδος, σκισίματα, σημάδια βανδαλισμού από όπλο, ζημιές που έχουν προκαλέσει πτηνά ή άλλα ζώα, ρύπανση, ρυτίδιασμα ή / και ρωγμές (crazing).
- φθορές συνδυαστικά στα κυάθια και το μονωτικό περίβλημα. Τέτοιες είναι: διάβρωση και δημιουργία αγωγίμων καναλιών άνθρακα (tracking and erosion), αποχρωματισμός, τρύπες, υποβάθμιση της ποιότητας του μονωτικού υλικού (alligatoring), ρύπανση, ανάπτυξη μούχλας, ζημιές κατά τη διάρκεια του χειρισμού (μεταφορά, αποθήκευση, τοποθέτηση).
- φθορές στους μεταλλικούς ακροδέκτες. Τέτοιες είναι: μερικώς αποσυνδεδεμένοι ακροδέκτες από τη ράβδο, ζημιά λόγω υπερπήδησης (flashover), υποβάθμιση της μόνωσης μεταξύ ακροδέκτη και ράβδου, διάβρωση.

- φθορές στους δακτυλίους που τοποθετούνται για τη μείωση του φαινομένου Corona (Corona rings). Τέτοιες είναι: ζημιά λόγω ηλεκτρικού τόξου (flashover), μετακίνηση ή χαλάρωση από τη σωστή θέση όπου θα πρέπει να βρίσκονται, σημάδια βανδαλισμού από όπλο [33, 34, 35, 36].

Στο σχήμα 2-1 παρατίθενται παραδείγματα από τα παραπάνω αναφερθέντα είδη αστοχίας.



α



β



γ



δ



ε



ζ



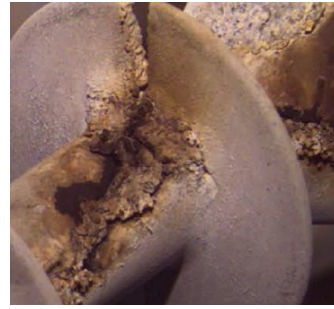
η



θ



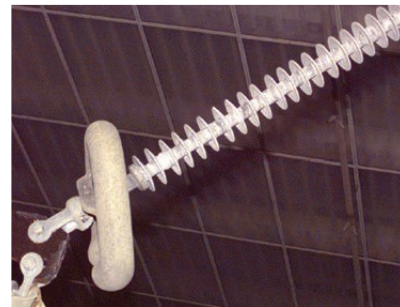
ι



κ



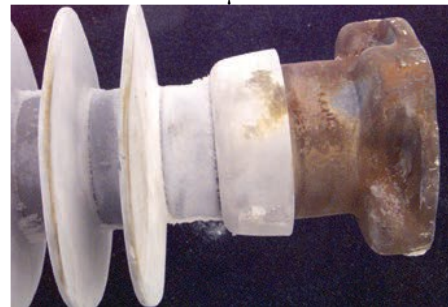
λ



μ



ν



ξ

Σχήμα 2-1. α) Σχισμένο κυάθιο, β) κομμένο κυάθιο λόγω κακού χειρισμού, γ) τρύπα σε κυάθιο, δ) σημάδια βανδαλισμού από όπλο, ε) ζημιά από πτηνό ή άλλο ζώο, ζ) εκτεθειμένη ράβδος, η) alligatoring, θ) μερικώς αποσυνδεδεμένοι ακροδέκτες από τη ράβδο, ι) αποχρωματισμός, κ) διάβρωση και δημιουργία αγωγίων καναλιών άνθρακα (tracking and erosion), λ) ανάπτυξη μούχλας, μ) χαλάρωση των δακτυλίων κατά του φαινομένου Corona από τη σωστή θέση τους, ν) ζημιά στο μεταλλικό ακροδέκτη λόγω ηλεκτρικού τόξου (flashover), ξ) διάβρωση μεταλλικού ακροδέκτη [33, 34, 35].

2.2 Δοκιμές στα υλικά των συνθετικών μονωτήρων

Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των συνθετικών μονωτήρων είναι ότι τα δομικά τους μέρη αποτελούνται από διαφορετικά υλικά (ράβδος από πλαστικό ενισχυμένο με υαλονήματα, μονωτικό περίβλημα συνήθως από σιλικονούχο καουτσούκ και μεταλλικοί ακροδέκτες από χάλυβα ή αλουμίνιο) και άρα με την έρευνα και την εξέλιξη των επιμέρους αυτών υλικών μπορεί να αναβαθμιστεί και η ποιότητα του συνθετικού μονωτήρα σαν σύνολο [4]. Υπάρχουν πολλές δοκιμές οι οποίες εξετάζουν την ποιότητα των επιμέρους υλικών ενός συνθετικού μονωτήρα. Σε αυτό το υποκεφάλαιο μελετώνται ορισμένες δοκιμές που αφορούν στο μονωτικό περίβλημα από σιλικονούχο καουτσούκ, στη ράβδο των μονωτήρων από πλαστικό ενισχυμένο με υαλονήματα και τέλος στον έλεγχο της σωστής σύνδεσης μεταξύ της ράβδου και του μονωτικού περιβλήματος.

2.2.1 Δοκιμές στο μονωτικό περίβλημα

2.2.1.1 Δοκιμή υδροφοβικότητας

Μία πολύ σημαντική ιδιότητα των συνθετικών μονωτήρων σε σχέση με τους πορσελάνινους και τους γυάλινους είναι η πολύ καλή υδροφοβικότητα που έχουν ακόμα και σε συνθήκες υψηλής ρύπανσης. Η μέτρηση της υδροφοβικότητας αποτελεί μια μη καταστροφική μέθοδο, που μπορεί να εφαρμοστεί και στο πεδίο και η οποία σε συνδυασμό με την οπτική επιθεώρηση μπορεί να δώσει μια αρκετά καλή εικόνα σχετικά με την κατάσταση και την ποιότητα ενός συνθετικού μονωτήρα [30]. Επίσης, η μέτρηση της υδροφοβικότητας αποτελεί ένα δείκτη για την ικανότητα του μονωτήρα να αντέχει σε υπερπηδήσεις (flashover), για την υποβάθμιση που μπορεί να έχει υποστεί το μονωτικό του περίβλημα (σιλικονούχο καουτσούκ), αλλά μπορεί να δώσει μια εικόνα και για τη γήρανση της επιφάνειας του υλικού αυτού [37].

Η μέτρηση της υδροφοβικότητας γίνεται σύμφωνα με τις οδηγίες της τεχνικής προδιαγραφής IEC TS 62073 [38]. Σύμφωνα με την παραπάνω τεχνική προδιαγραφή, υπάρχουν τρεις μέθοδοι οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν για τη μέτρηση της υδροφοβικότητας σε συνθετικούς μονωτήρες και οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους στην ακρίβεια, στην ευκολία διεξαγωγής, στο μέγεθος της μετρούμενης επιφάνειας και στη δυνατότητα εφαρμογής τους σε εργαστηριακό περιβάλλον, σε εξωτερικό περιβάλλον (στο ηλεκτρικό δίκτυο) ή και στα δύο.

Οι τρεις αυτές μέθοδοι είναι:

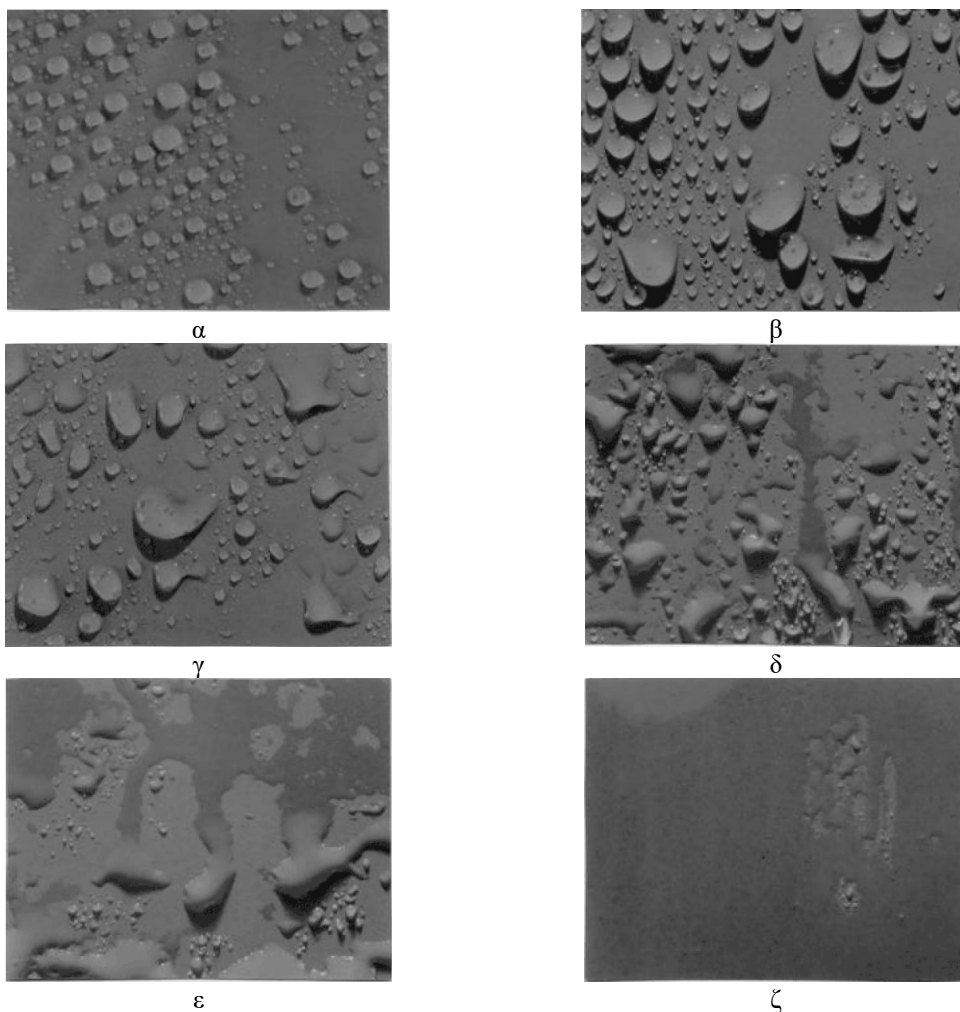
- η μέθοδος γωνίας επαφής (contact angle method)
- η μέθοδος επιφανειακής τάσης (surface tension method)
- και η μέθοδος ψεκασμού (spray method).

Η μέθοδος γωνίας επαφής περιλαμβάνει τη μέτρηση της γωνίας επαφής που σχηματίζεται μεταξύ της άκρης ενός σταγονιδίου νερού και της επιφάνειας ενός στερεού υλικού. Εάν γίνει σε οριζόντια επιφάνεια, μπορούν να μετρηθούν οι δύο γωνίες που σχηματίζονται μεταξύ της σταγόνας και του υλικού (οξεία και αμβλεία). Οι γωνίες αυτές εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την τραχύτητα της επιφάνειας και επηρεάζονται πολύ αν μετρηθούν σε καθαρή και λεία επιφάνεια σε σχέση με το αν μετρηθούν σε ρυπασμένη επιφάνεια. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται συνήθως γι' αυτή τη μέτρηση είναι μια μεγεθυντική

συσκευή με βαθμονομημένο γωνιόμετρο σταθερό σε μία βάση, ή με τη χρήση ενός συστήματος φακού που φωτίζει την σταγόνα από την πίσω πλευρά και δημιουργεί μια σκιά της σταγόνας σε βαθμονομημένο φόντο, ενώ τέλος υπάρχουν και διατάξεις που χρησιμοποιούν φωτογραφική μηχανή, οθόνη και υπολογιστή για την ανάλυση των μετρήσεων [38].

Η μέθοδος καθορισμού της επιφανειακής τάσης (surface tension) της επιφάνειας βασίζεται στο ότι οι σταγόνες μιας σειράς από οργανικά υγρά μείγματα, τα οποία εμφανίζουν αυξανόμενη επιφανειακή τάση, έχουν διαφορετική ικανότητα διαβροχής της επιφάνειας του μονωτήρα. Σε αυτή τη δοκιμή είναι σημαντικό να μην υπάρχει το παραμικρό ίχνος από ακαθαρσίες επάνω στην επιφάνεια του μονωτήρα γιατί μπορεί να επηρεαστούν τα αποτελέσματα. Γι' αυτό συνιστάται η επιφάνεια που θα δοκιμαστεί να μην έχει αγγιχτεί από γυμνά χέρια, όλος ο εξοπλισμός να είναι καθαρός και ιδιαιτέρως τα οργανικά υγρά μείγματα να είναι αυξημένης καθαρότητας [38].

Η τελευταία μέθοδος που προδιαγράφεται στην τεχνική προδιαγραφή IEC TS 62073 για τη μέτρηση της υδροφοβικότητας στους συνθετικούς μονωτήρες είναι η μέθοδος ψεκασμού. Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε αυτό που βλέπει ο χειριστής έπειτα από ψεκασμό της επιφάνειας του μονωτήρα με νερό. Ο εξοπλισμός που χρειάζεται είναι απλό ψεκαστήρι, υψηλής ποιότητας νερό βρύσης ή αποσταγμένο νερό και μία φωτογραφική μηχανή. Η διαδικασία μέτρησης περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα. Αρχικά, ο χειριστής γεμίζει το ψεκαστήρι με υψηλής ποιότητας νερό βρύσης ή αποσταγμένο νερό και ψεκάζει το μονωτήρα από απόσταση $20\text{ cm} \pm 10\text{ cm}$, για 10 s έως 20 s ή έως ότου το νερό να αρχίσει να ρέει από την επιφάνεια των κυathίων. Η επιφάνεια δοκιμής πρέπει να είναι περίπου 50 cm^2 έως 100 cm^2 . Στη συνέχεια, αν είναι απαραίτητο χρησιμοποιείται μια φωτογραφική μηχανή και λαμβάνεται φωτογραφία της ψεκασμένης επιφάνειας. Τέλος, ένας έμπειρος χειριστής πρέπει να αποφασίσει σε ποια από τις επτά κατηγορίες υδροφοβικότητας ανήκει ο συγκεκριμένος μονωτήρας. Οι επτά κατηγορίες υδροφοβικότητας επεξηγούνται στο Πρότυπο, αλλά για καλύτερα αποτελέσματα μπορεί ο χειριστής να επιλέξει την κλάση υδροφοβικότητας του μονωτήρα συγκρίνοντας αυτό που βλέπει με τις αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες της κάθε κλάσης υδροφοβικότητας που φαίνονται στο σχήμα 2-2. Σημειώνεται εδώ ότι η κλάση υδροφοβικότητας 7, για την οποία δεν υπάρχει αντιπροσωπευτική φωτογραφία αναφέρεται σε 100% καλυμμένη από νερό μετρούμενη επιφάνεια [38].

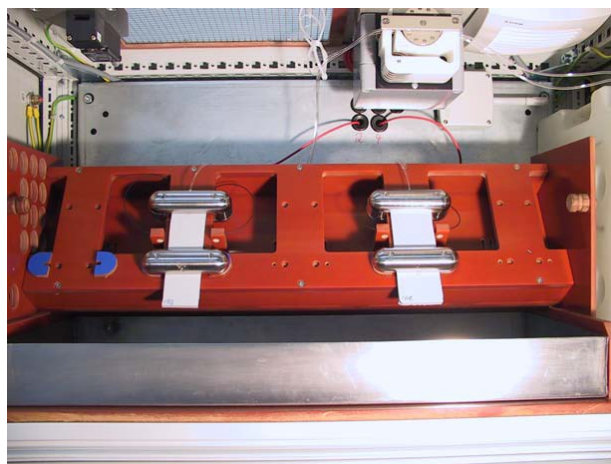


Σχήμα 2-2. α) Κλάση υδροφοβικότητας 1, β) κλάση υδροφοβικότητας 2, γ) κλάση υδροφοβικότητας 3, δ) κλάση υδροφοβικότητας 4, ε) κλάση υδροφοβικότητας 5, ζ) κλάση υδροφοβικότητας 6 [38].

Το κύριο πρόβλημα αυτής της μεθόδου είναι ότι στο στάδιο της σύγκρισης με τις τυπικές φωτογραφίες, το αποτέλεσμα εξαρτάται από την κρίση του χειριστή [39]. Έτσι, πολλοί ερευνητές σε όλο τον κόσμο προσπαθούν να περιορίσουν την υποκειμενικότητα της ανθρώπινης κρίσης σε αυτήν τη μέτρηση χρησιμοποιώντας ψηφιακές τεχνικές επεξεργασίας εικόνας και αναγνώρισης προτύπων, όπου με χρήση νευρωνικών δικτύων ο υπολογιστής να αποφασίζει για το αποτέλεσμα [40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47].

Επίσης, μία άλλη δοκιμή η οποία έχει αναπτυχθεί για τη μέτρηση και ποσοτικοποίηση της υδροφοβικότητας είναι το λεγόμενο “dynamic drop test”. Η πειραματική διάταξη είναι παρόμοια με αυτήν της δοκιμής του κεκλιμένου επιπέδου (αναλύεται στο υποκεφάλαιο 2.2.1.4), με τη βασική διαφορά ότι εδώ τα δοκίμια που είναι τοποθετημένα υπό γωνία δεν κοιτάνε προς τα κάτω αλλά προς τα πάνω (σχήμα 2-3). Σε αυτή τη δοκιμή ιοντικό διάλυμα ρέει από την πάνω μεριά του δοκιμίου προς την κάτω. Ο ρυθμός της ροής καθορίζει το πόσο «αυστηρή» είναι η δοκιμή. Το αποτέλεσμα της δοκιμής αυτής είναι ο χρόνος που

απαιτείται για να αναπτυχθεί ένα συνεχές μονοπάτι ιοντικού διαλύματος στην επιφάνεια του υλικού με έναν ορισμένο ρυθμό ροής. Το τελικό αποτέλεσμα καθορίζεται από την αύξηση του ρεύματος διαρροής, όταν σχηματίζεται η συνεχής διαδρομή [29, 48, 49].



Σχήμα 2-3. Πειραματική διάταξη για το dynamic drop test [49].

Πέρα από την ίδια την ιδιότητα της υδροφοβικότητας, άλλο ένα σημαντικό πλεονέκτημα των συνθετικών μονωτήρων από σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) σε σχέση με τους κεραμικούς και τους γυάλινους μονωτήρες είναι ότι έχουν την ιδιότητα της ανάκτησης της υδροφοβικότητας τους σε περιπτώσεις μεγάλης ρύπανσης. Αυτή η ιδιότητα αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως η μεταφορά από το εσωτερικό του σιλικονούχου καουτσούκ (silicone rubber) προς την εξωτερική επιφάνεια, υψηλής κινητικής ενέργειας και χαμηλού μοριακού βάρους μοριακών αλυσίδων (low molecular weight chains), οι οποίες μετατρέπουν το υλικό ξανά από υδρόφιλο σε υδρόφοβο. Έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι η ανάκτηση αυτή της υδροφοβικότητας του σιλικονούχου καουτσούκ μπορεί να πάρει από 24 μέχρι και 60 ώρες από τη στιγμή που χάθηκε η υδρόφοβη συμπεριφορά του υλικού λόγω στρώματος ρύπανσης ή στρώματος νερού [48, 49, 50, 51].

Η ιδιότητα της υδροφοβικότητας των συνθετικών μονωτήρων επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες. Συγκεκριμένα, υπάρχουν αναφορές ότι η υδροφοβικότητα μειώνεται λόγω του φαινομένου Corona που συμβαίνει στους μονωτήρες, λόγω της ρύπανσης, της μούχλας, της συγκέντρωσης πάγου και επίσης όταν ο μονωτήρας βρίσκεται υπό συνεχή διαβροχή [49, 51, 52, 53]. Επίσης, υπάρχουν αναφορές ότι η υδροφοβικότητα γίνεται πιο ισχυρή με αύξηση της θερμοκρασίας, καθώς διευκολύνεται ο μηχανισμός ανάκτησης της υδροφοβικότητας [51, 52]. Σχετικά με την επίδραση της υπεριώδους ακτινοβολίας (UV) φαίνεται από τη βιβλιογραφία ότι μάλλον επηρεάζει αρνητικά την υδροφοβικότητα [54,

55], όμως υπάρχει και αναφορά που υποστηρίζει πως η UV ακτινοβολία κάνει ελάχιστα πιο ισχυρή την υδροφοβικότητα των μονωτήρων από σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) [51].

2.2.1.2 Δοκιμή μέτρησης της σκληρότητας Shore A

Η πιο συνηθισμένη δοκιμή, για τον προσδιορισμό της κατάστασης του σιλικονούχου καουτσούκ (silicone rubber) των συνθετικών μονωτήρων στη βιομηχανία ελαστικών είναι η μέτρηση της σκληρότητας Shore A. Πρόκειται για μια πολύ απλή και γρήγορη δοκιμή, η οποία μπορεί να δώσει αποτελέσματα για το εάν ο συνθετικός μονωτήρας είναι κατασκευασμένος με το υλικό που ορίζεται στην προδιαγραφή από τον κατασκευαστή του και όχι με άλλο χειρότερης ποιότητας [29, 56]. Αυτή η μέτρηση μπορεί να διεξαχθεί με τη χρήση μιας ψηφιακής συσκευής μέτρησης της σκληρότητας Shore A. Η αρχή λειτουργίας αυτών των συσκευών μέτρησης της σκληρότητας Shore A είναι ότι αξιολογούν τη σκληρότητα του υλικού συγκρίνοντας το βάθος στο οποίο διεισδύει μια ακίδα στην άκρη της συσκευής μέσα στο υπό δοκιμή υλικό, με το βάθος διείσδυσης αυτής της ακίδας σε ένα τυποποιημένο δείγμα υλικού από καουτσούκ [57, 58].

Η μέτρηση αυτή εκτελείται σύμφωνα με το Πρότυπο ISO 48-4 [59]. Η συσκευή μέτρησης της σκληρότητας Shore A μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως φορητή συσκευή, είτε προσαρμοσμένη σε μία βάση. Το Πρότυπο επίσης καθορίζει τις διαστάσεις, το πάχος και διάφορες άλλες απαιτήσεις που θα πρέπει να πληρούν τα δοκίμια. Συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι τα δοκίμια θα πρέπει να ετοιμαστούν σύμφωνα με το Πρότυπο ISO 23529 [60], αλλά επίσης αναφέρει, ως ειδική απαίτηση για τη συγκεκριμένη μέτρηση, ότι το δοκίμιο θα πρέπει να έχει πάχος τουλάχιστον 6 mm και αν αυτή η απαίτηση δε μπορεί να ικανοποιηθεί τότε επιτρέπεται να τοποθετηθούν μέχρι και 3 λεπτά τεμάχια του δοκιμίου το ένα επάνω στο άλλο, ώστε να επιτευχθεί το πάχος των 6 mm. Επίσης, αναφέρεται ότι οι υπόλοιπες διαστάσεις του δοκιμίου θα πρέπει να είναι επαρκείς ώστε οι μετρήσεις να μπορούν να γίνονται σε απόσταση τουλάχιστον 12 mm από οποιαδήποτε άκρη του δοκιμίου. Η επιφάνεια του δοκιμίου θα πρέπει να είναι επίπεδη και παράλληλη σε μια σκληρή επιφάνεια, η οποία θα αντέχει την άσκηση της απαιτούμενης πίεσης ώστε να ληφθεί η μέτρηση. Η επιφάνεια του δοκιμίου δε θα πρέπει να είναι καμπύλη, ανώμαλη ή τραχιά, καθώς τα αποτελέσματα της μέτρησης δε θα είναι ικανοποιητικά [59].

Όσον αφορά τις περιβαλλοντικές συνθήκες κατά τη μέτρηση το Πρότυπο αναφέρει ότι η μέτρηση θα πρέπει να γίνεται μέσα στις τυπικές περιβαλλοντικές συνθήκες εργαστηρίου

(θερμοκρασία: $(23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C})$ ή $(27 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C})$, σχετική υγρασία: $(50 \pm 10\%)$ ή $(65 \pm 10\%)$ αντίστοιχα [59, 60]), καθώς επίσης ότι μετρήσεις οι οποίες προορίζονται για σύγκριση μεταξύ τους θα πρέπει να λαμβάνονται στην ίδια θερμοκρασία [59].

Τέλος, το Πρότυπο καθορίζει τη διαδικασία της μέτρησης. Αναφέρει ότι θα πρέπει το δοκίμιο να τοποθετηθεί σε επίπεδη και σκληρή επιφάνεια και στη συνέχεια να εφαρμοστεί πίεση επάνω στο όργανο, όσο το δυνατόν πιο ακαριαία, αλλά χωρίς να χτυπηθεί το όργανο. Το όργανο θα πρέπει να παραμείνει σε αυτή τη θέση μέτρησης για 3 s, αν το μετρούμενο υλικό είναι βουλκανισμένο ελαστικό, ή για 15 s, αν το υλικό είναι θερμοπλαστικό ελαστικό. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλοι χρόνοι μέτρησης αρκεί να αναφέρονται στην αναφορά των μετρήσεων. Με τον ίδιο τρόπο λαμβάνονται 3 μετρήσεις (αν πρόκειται για γνωστό υλικό) ή 5 μετρήσεις (για άγνωστο υλικό) σε διαφορετικές θέσεις επάνω στο προς μέτρηση υλικό, οι οποίες απέχουν μεταξύ τους τουλάχιστον 6 mm. Το αποτέλεσμα της μέτρησης είναι η μέση τιμή των παραπάνω μετρήσεων [59].

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η μέτρηση της σκληρότητας Shore A εξαρτάται από το πάχος των υπό δοκιμή δειγμάτων. Το πάχος του δείγματος καθορίζεται από το Πρότυπο να είναι τουλάχιστον 6 mm. Σε συμφωνία με αυτήν την απαίτηση του προτύπου, οι συγγραφείς του [61] παρατήρησαν ότι κατά τη μέτρηση δειγμάτων με πάχος κάτω των 6 mm η σκληρότητα και το σφάλμα της μέτρησης γίνονται όλο και μεγαλύτερα, καθώς μειώνεται το πάχος. Ως εκ τούτου, όταν η μέτρηση αυτή πρέπει να εφαρμοστεί σε ένα συνθετικό μονωτήρα, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία θα πρέπει να κοπούν δύο κυάθια του μονωτήρα (ή ένα κυάθιο το οποίο θα κοπεί πάλι στη μέση για να γίνει δύο κομμάτια) και να τοποθετηθούν το ένα πάνω από το άλλο για να φτάσουν τα 6mm [29].

Η μέτρηση της σκληρότητας Shore A έχει δύο πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα, όταν πραγματοποιείται σε συνθετικούς μονωτήρες. Πρώτον, αυτή η μέτρηση μπορεί να παράσχει κάποια γνώση σχετικά με τη γήρανση - ηλικία των μετρούμενων μονωτήρων (όταν αναφερόμαστε σε μονωτήρες αποξηλωμένους από το ηλεκτρικό δίκτυο), κάτι που είναι πολύ σημαντικό ειδικά σε περιπτώσεις που έχει συμβεί κάποια αστοχία και προσπαθεί να διερευνηθεί η αιτία αυτής της αστοχίας. Παρατηρήθηκε ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της μέτρησης της σκληρότητας Shore A και της γήρανσης των μετρούμενων μεταχειρισμένων μονωτήρων. Πιο συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη είναι η γήρανση του σιλικονούχου καουτσούκ (silicone rubber) των μονωτήρων, τόσο υψηλότερη θα είναι η μετρούμενη τιμή σκληρότητας Shore A και αντιστρόφως [62, 63, 64]. Ο προαναφερθής

συσχετισμός έχει αποδειχθεί αληθινός σε πολλές διαφορετικές περιπτώσεις μηχανισμών γήρανσης σε συνθετικούς μονωτήρες από σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber), όπως η φυσική γήρανση [65, 66, 67], η τεχνητή γήρανση κατά τη δοκιμή ομίχλης άλατος (salt-fog test) [68], τεχνητή γήρανση κατά τη δοκιμή τροχού (tracking wheel test) [69] και τεχνητή γήρανση με υπεριώδη ακτινοβολία [70].

Το δεύτερο πολύ σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μέτρησης, όταν εφαρμόζεται σε συνθετικούς μονωτήρες από σιλικονούχο καουτσούκ, είναι ότι μπορεί να δώσει μια ικανοποιητική εντύπωση ως προς το εάν το μετρούμενο σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) περιέχει πληρωτικά μέσα. Στο σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) των συνθετικών μονωτήρων έχει καθιερωθεί από τους κατασκευαστές η προσθήκη διαφόρων πρόσθετων – πληρωτικών υλικών προκειμένου να βελτιωθούν οι ιδιότητές του. Για παράδειγμα, το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο πληρωτικό υλικό στη βιομηχανία συνθετικών μονωτήρων είναι το aluminium - trihydrate (ATH: $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$), το οποίο μπορεί να αυξήσει την αντοχή του σιλικονούχου καουτσούκ (silicone rubber) στη διάβρωση και στη δημιουργία αγωγίμων καναλιών άνθρακα (tracking and erosion resistance) [71]. Έρευνα σε αυτόν τον τομέα έδειξε ότι όσο υψηλότερη είναι η συγκέντρωση των πληρωτικών στο σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber), τόσο υψηλότερη θα είναι η μετρούμενη τιμή σκληρότητας Shore A [56, 63, 72, 73, 74].

2.2.1.3 Δοκιμή προσδιορισμού της πυκνότητας

Η δοκιμή προσδιορισμού της πυκνότητας είναι άλλη μία πολύ συνηθισμένη και πλέον καθιερωμένη μέτρηση στη βιομηχανία καουτσούκ. Η μέτρηση αυτή γίνεται σύμφωνα με το Πρότυπο ISO 2781 [75]. Σύμφωνα με το Πρότυπο, ο εξοπλισμός που απαιτείται για αυτή τη δοκιμή είναι: μία ζυγαριά με ακρίβεια ± 1 mg, μία διάταξη μέτρησης της πυκνότητας που προσαρμόζεται επάνω στη ζυγαριά (για τη μέθοδο A), ένα ποτήρι ζέσεως χωρητικότητας 250 cm³ (για τη μέθοδο A) ή ένας ογκομετρικός σωλήνας (για τη μέθοδο B) [75]. Οι μέθοδοι A και B εξηγούνται παρακάτω.

Το δοκίμιο προς μέτρηση θα πρέπει να είναι ένα κομμάτι από το καουτσούκ του οποίου την πυκνότητα θέλουμε να μετρήσουμε. Το κομμάτι αυτό θα πρέπει να έχει λείες επιφάνειες, χωρίς σκισίματα και σκόνες και θα πρέπει να έχει μάζα τουλάχιστον 2,5 g (μέθοδος A). Για τη μέθοδο B το σχήμα και το μέγεθος του κομματιού θα πρέπει να είναι τέτοιο που να επιτρέπει το κόψιμο του σε κατάλληλα κομματάκια (βλέπε παρακάτω). Η

μέτρηση της πυκνότητας θα πρέπει να γίνει σε τουλάχιστον δύο κομμάτια από το μετρούμενο υλικό [75].

Η δοκιμή αυτή θα πρέπει να εκτελείται σε θερμοκρασία 23 ± 2 °C ή 27 ± 2 °C και μετρήσεις οι οποίες προορίζονται για επεξεργασία και σύγκριση μεταξύ τους θα πρέπει να λαμβάνονται στην ίδια θερμοκρασία [75].

Το συγκεκριμένο Πρότυπο περιγράφει δύο μεθόδους προσδιορισμού της πυκνότητας: τη μέθοδο A και τη μέθοδο B.

Κατά τη μέθοδο A το δοκίμιο πρέπει να έχει μάζα τουλάχιστον 2,5 g. Αρχικά μετράται η μάζα του δοκιμίου στον αέρα και έπειτα η μάζα του δοκιμίου, αφού αυτό έχει βυθιστεί σε απιονισμένο νερό, μέσω της διάταξης για μέτρηση της πυκνότητας που προσαρμόζεται επάνω στη ζυγαριά. Στη συνέχεια μέσω της εξίσωσης 2-1 υπολογίζεται η πυκνότητα του υλικού. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται τουλάχιστον μία φορά ακόμα [75].

$$\rho = \rho_w \frac{m_1}{m_1 - m_2} \quad (2-1)$$

Όπου:

ρ_w είναι η πυκνότητα του νερού (για τις περισσότερες περιπτώσεις η πυκνότητα του νερού σε τυπική θερμοκρασία εργαστηρίου μπορεί να λαμβάνεται ίση με $1,00 \text{ g/cm}^3$).

m_1 είναι η μάζα του δοκιμίου (κομμάτι καουτσούκ) στον αέρα.

m_2 είναι η μάζα του δοκιμίου (κομμάτι καουτσούκ) μείον τη μάζα ίσου όγκου νερού που προσδιορίζεται με ζύγιση στο νερό [75].

Η μέθοδος B χρησιμοποιείται μόνο σε περιπτώσεις, όπου είναι απαραίτητο το δοκίμιο να κοπεί σε πολύ μικρά κομμάτια για να εξαλειφθούν πιθανές φυσαλίδες αέρος, οι οποίες ενδέχεται να υπάρχουν στο εσωτερικό του υλικού και οι οποίες αποτελούν το σημαντικότερο σφάλμα αυτής της μέτρησης. Για τη μέτρηση αυτή κόβονται μικρά κομματάκια του υλικού σε σχήμα κύβου με τις δύο διαστάσεις να μην ξεπερνούν τα 4 mm και την τρίτη διάσταση να μην ξεπερνά τα 6 mm. Η συνολική μάζα όλων των κομματιών αυτών θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 2,5 g. Με τη βοήθεια της ζυγαριάς και του

ογκομετρικού σωλήνα γίνονται οι παρακάτω μετρήσεις οι οποίες έπειτα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της πυκνότητας, όπως φαίνεται στην εξίσωση 2-2 [75].

$$\rho = \rho_w \frac{m_2 - m_1}{m_4 - m_3 + m_2 - m_1} \quad (2-2)$$

Όπου:

ρ_w είναι η πυκνότητα του νερού (για τις περισσότερες περιπτώσεις η πυκνότητα του νερού σε τυπική θερμοκρασία εργαστηρίου μπορεί να λαμβάνεται ίση με 1,00 g/cm³).

m_1 είναι η μάζα του ογκομετρικού σωλήνα.

m_2 είναι η μάζα του ογκομετρικού σωλήνα και του δοκιμίου (κομματάκια καουτσούκ).

m_3 είναι η μάζα του ογκομετρικού σωλήνα, του δοκιμίου (κομματάκια καουτσούκ) και του νερού (συγκεκριμένης ποσότητας).

m_4 είναι η μάζα του ογκομετρικού σωλήνα με νερό (συγκεκριμένης ποσότητας) [75].

Η κύρια πηγή σφάλματος της συγκεκριμένης μέτρησης είναι οι φυσαλίδες οι οποίες προσκολλώνται στο δοκίμιο κατά τη βύθιση του μέσα στο νερό για διεξαγωγή της μέτρησης. Γι' αυτό το λόγο, όταν πρόκειται η δοκιμή να γίνει σε κάποιο υδρόφοβο υλικό, όπως το σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) των συνθετικών μονωτήρων, προτείνεται να προστίθεται μέσα στο απιονισμένο νερό που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση μικρή ποσότητα από κάποιο παράγοντα υγροποίησης (wetting agent), ο οποίος μειώνει την επιφανειακή τάση (surface tension) του νερού και με αυτόν τον τρόπο εμποδίζει τη δημιουργία φυσαλίδων [4, 76].

Στην περίπτωση που απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια στη μέτρηση της πυκνότητας από αυτήν που ορίζει το Πρότυπο ISO 2781 [75], τότε αυτή μπορεί να επιτευχθεί με εφαρμογή της μεθόδου στήλης πυκνότητας, όπως αυτή περιγράφεται στο Πρότυπο ISO 1183-2 [77]. Η βασική αρχή της μεθόδου αυτής είναι ότι δύο αναμίξιμα υγρά διαφορετικών πυκνοτήτων διοχετεύονται πολύ αργά σε ένα δοχείο, ώστε να προκύψει μια ομοιόμορφη βαθμίδα πυκνότητας από τον πυθμένα έως την κορυφή του δοχείου. Αυτή η στήλη μπορεί στη συνέχεια να βαθμονομηθεί με τη βοήθεια κάποιων υλικών γνωστής πυκνότητας που θα αφηθούν να βυθιστούν μέσα στο υγρό της και θα ισορροπήσουν στο σημείο, όπου η

πυκνότητά τους θα ισούται με εκείνη του περιβάλλοντος υγρού. Στη συνέχεια εισάγονται στη στήλη και αφήνονται να βυθιστούν μέχρι το σημείο που θα ισορροπήσουν μικρά κομματάκια από το δοκίμιο. Έπειτα, μετριέται το ύψος της στήλης στο οποίο έχουν ισορροπήσει και η πυκνότητά τους συνάγεται από ένα γράφημα βαθμονόμησης [76, 78].

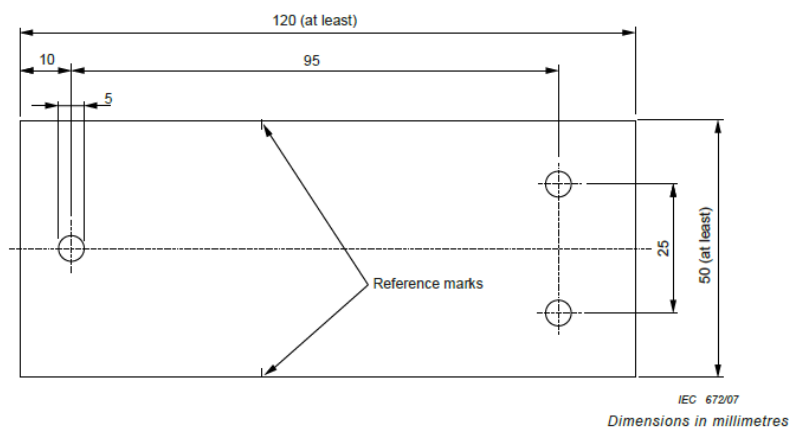
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στη βιομηχανία των συνθετικών μονωτήρων χρησιμοποιούνται διάφορα πληρωτικά υλικά μέσα στο σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) με σκοπό την επίτευξη καλύτερων ιδιοτήτων όσον αφορά τη δημιουργία αγωγίμων καναλιών άνθρακα και τη διάβρωση του μονωτικού περιβλήματος (silicone rubber), με συνηθέστερο τέτοιο υλικό το aluminium - trihydrate (ATH: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Έχει διαπιστωθεί ότι η μέτρηση της πυκνότητας του σιλικονούχου καουτσούκ (silicone rubber) μπορεί να δώσει μια αρχική πληροφορία για αυτή τη σύσταση του υλικού και για το αν περιέχει όντως κάποιο πληρωτικό υλικό μέσα του [73, 76, 78, 79]. Επίσης, μπορεί να δώσει μια εικόνα για την κατασκευαστική διαδικασία που ακολουθήθηκε για το μονωτικό περίβλημα των συνθετικών μονωτήρων. Αναφέρεται ότι, το HTV σιλικονούχο καουτσούκ (high temperature vulcanized silicone rubber) το οποίο χρησιμοποιείται σήμερα ως επί το πλείστον έχει πυκνότητα $>1,5 \text{ g/cm}^3$, ενώ το RTV σιλικονούχο καουτσούκ (room temperature vulcanized silicone rubber), το LSR (liquid silicone rubber) και το EPDM rubber (ethylene propylene diene monomer rubber) έχουν μικρότερες τιμές πυκνότητας. Έτσι, η μέτρηση της πυκνότητας αποτελεί μια γρήγορη, αλλά και αποτελεσματική δοκιμή είτε για τους κατασκευαστές κατά το γρήγορο έλεγχο δειγμάτων από μεγάλες παρτίδες ώστε να αποφευχθεί κάποιο σοβαρό λάθος στη σύνθεση των υλικών των συνθετικών μονωτήρων, είτε για τους αγοραστές των συνθετικών μονωτήρων, οι οποίοι μπορούν εύκολα και γρήγορα να έχουν μια προσεγγιστική εικόνα για το μονωτικό περίβλημα των συνθετικών μονωτήρων που αγοράζουν [4, 56, 71, 80].

2.2.1.4 Δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου (*inclined plane test*)

Στη βιομηχανία των συνθετικών μονωτήρων μία ακόμη καθιερωμένη δοκιμή για το μονωτικό περίβλημα είναι η δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου (*inclined plane test*). Με τη δοκιμή αυτή μπορεί κανείς να αποφανθεί αν το μονωτικό υλικό που εξετάζει είναι ανθεκτικό στη δημιουργία αγωγίμων καναλιών άνθρακα και στη διάβρωση [4, 33, 81, 82, 83]. Η δοκιμή αυτή είναι σημαντική τόσο για τους κατασκευαστές συνθετικών μονωτήρων, κατά το στάδιο του σχεδιασμού και ανάπτυξης για την καλύτερη ανάπτυξη του υλικού,

όσο και για τους αγοραστές τους κατά το στάδιο των δοκιμών αποδοχής για τον έλεγχο της ποιότητας των υλικών [33].

Η δοκιμή αυτή εκτελείται σύμφωνα με τις οδηγίες που αναγράφονται στο Πρότυπο IEC 60587 [84]. Σύμφωνα με το Πρότυπο τα δοκίμια θα πρέπει να έχουν διαστάσεις τουλάχιστον 50 mm x 120 mm και το πάχος τους θα πρέπει να είναι 6 mm. Στα δοκίμια θα πρέπει επίσης να δημιουργηθούν τρεις τρύπες, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-4, ώστε να μπορούν ύστερα να προσαρμοστούν τα ηλεκτρόδια που απαιτούνται για τη δοκιμή [84].

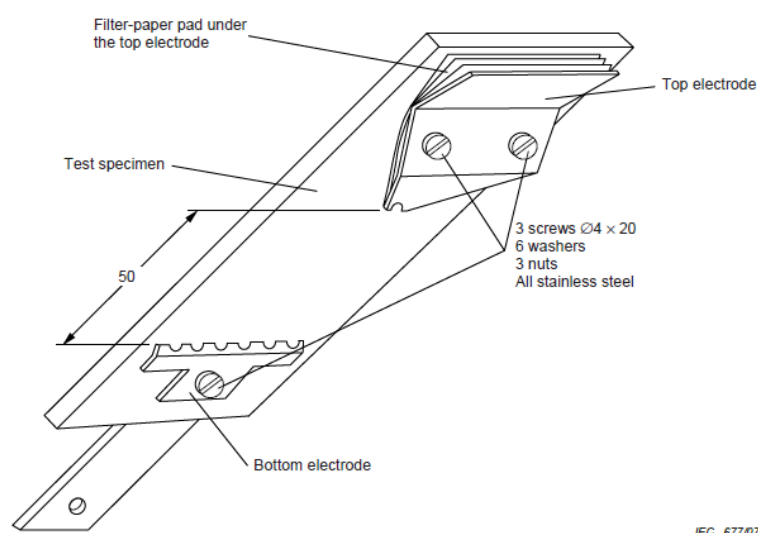


Σχήμα 2-4. Δοκίμιο με διαστάσεις και τρύπες για τη δοκιμή του κεκλιμένου επιπέδου [84].

Στη συνέχεια, τα δοκίμια πλένονται με ισοπροπυλική αλκοόλη και έπειτα με απιονισμένο νερό, ώστε να αφαιρεθούν υπολείμματα από την επεξεργασία και την επαφή με τα χέρια. Ακολούθως, τα δοκίμια τοποθετούνται σε πλαστικές βάσεις μέσω μεταλλικών ηλεκτροδίων (σχήμα 2-5) προσεκτικά ώστε να αποφευχθεί η ρύπανση τους. Εν συνεχεία, οι πλαστικές βάσεις με τα δοκίμια θα πρέπει να στηριχθούν στη συσκευή δοκιμής υπό γωνία $45^\circ \pm 2^\circ$ με τα δοκίμια να είναι στραμμένα προς τα κάτω όπως φαίνεται στο σχήμα 2-5. Επίσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-5, η απόσταση των άκρων των μεταλλικών ηλεκτροδίων θα πρέπει να είναι 50mm [84].

Για τη δοκιμή αυτή απαιτείται η παρασκευή ρυπαντικού διαλύματος, το οποίο αποτελείται από $0,1 \% \pm 0,002 \%$ κατά βάρος από χλωριούχο αμμώνιο (NH_4Cl : ammonium chloride), από $0,02 \% \pm 0,002 \%$ κατά βάρος από ισοοκτυλοφαινοξυπολυαιθανόλη (isooctylphenoxyethoxyethanol), το οποίο είναι ένας παράγοντας υγροποίησης (wetting agent) και το υπόλοιπο μέρος από απιονισμένο νερό. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι χρησιμοποιείται ο παράγοντας υγροποίησης Triton – X100, ο οποίος προσομοιώνει τη βαθιά γήρανση του μονωτικού υλικού και έχει σαν αποτέλεσμα να

καταστρέφει τις υδρόφοβες ιδιότητες του υλικού [4, 33, 85]. Το διάλυμα αυτό θα πρέπει να έχει ειδική αντίσταση $3,95 \Omega m \pm 0,05 \Omega m$ στους $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. Το διάλυμα αυτό θα πρέπει να ποτίσει το φίλτρο από χαρτί (σχήμα 2-5) που βρίσκεται στο πάνω ηλεκτρόδιο και να δημιουργήσει μονοπάτι ροής μεταξύ του πάνω και του κάτω ηλεκτροδίου πριν εφαρμοστεί τάση [84].



Σχήμα 2-5. Μεταλλικά ηλεκτρόδια και γωνία τοποθέτησης των δοκιμίων για τη δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου (οι διαστάσεις στο σχήμα είναι σε χιλιοστά) [84].

Επίσης, για τη δοκιμή αυτή θα πρέπει να υπάρχει εξαερισμός στο θάλαμο (συσκευή) που θα πραγματοποιηθεί, ο οποίος θα είναι συνεχής κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της δοκιμής. Η θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιείται η δοκιμή αυτή είναι $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ [84].

Σύμφωνα με το Πρότυπο απαιτούνται 5 δοκίμια για την εκτέλεση της δοκιμής και μπορεί να εφαρμοστεί είτε η μέθοδος 1 είτε η μέθοδος 2 του προτύπου. Κατά τη μέθοδο 1 (εφαρμογή σταθερής τάσης) ρυθμίζεται η ροή του ρυπαντικού διαλύματος και η εν σειρά αντίσταση της συσκευής ανάλογα με την επιδιωκόμενη τάση στην οποία θα γίνει η δοκιμή σύμφωνα με τον πίνακα 2-1 και στη συνέχεια η τάση διατηρείται σταθερή για 6 ώρες. Από την άλλη μεριά, σύμφωνα με τη μέθοδο 2 επιλέγεται μια τάση (πολλαπλάσιο του 250 V) και στη συνέχεια ανά μία ώρα αυξάνεται η τάση με βήμα 250V μέχρι να συμβεί αστοχία του υλικού κατά το κριτήριο A (εξηγείται παρακάτω). Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι κατά τις αυξήσεις αυτές της τάσης θα πρέπει η ροή του ρυπαντικού διαλύματος και η εν σειρά αντίσταση της συσκευής να ρυθμίζονται σύμφωνα με τον πίνακα 2-1 [84].

Πίνακας 2-1. Παράμετροι δοκιμής [84].

Τάση Δοκιμής [kV]	Επιθυμητή τάση δοκιμής για τη Μέθοδο 1 [kV]	Ρυθμός ροής ρυπαντικού διαλύματος [ml/min]	Εν σειρά αντίσταση [kΩ]
1,00 – 1,75	-	0,075	1
2,00 – 2,75	2,50	0,150	10
3,00 – 3,75	3,50	0,300	22
4,00 – 4,75	4,50	0,600	33
5,00 – 6,00	-	0,900	33

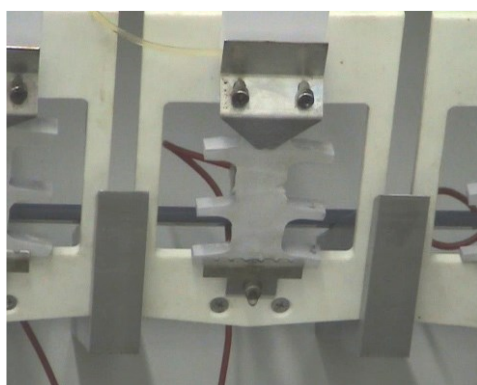
Υπάρχουν δύο κριτήρια τερματισμού της δοκιμής αυτής που θα πρέπει να επιλεγεί ποιο από τα δύο θα ακολουθηθεί. Το κριτήριο A είναι όταν το ρεύμα διαρροής ξεπεράσει τα 60 mA (όχι για λιγότερο από 2 s) ή όταν δημιουργηθεί τρύπα στο δοκίμιο. Το κριτήριο B είναι όταν δημιουργηθεί αγωγίμο κανάλι άνθρακα επάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου στα 25 mm από το κάτω ηλεκτρόδιο ή όταν δημιουργηθεί τρύπα στο δοκίμιο. Το κριτήριο A επιτρέπει τη χρήση αυτοματοποιημένων συσκευών και είναι το συνηθέστερο, ενώ το κριτήριο B απαιτεί συνεχή οπτική παρακολούθηση του δοκιμίου [84].

Κάποιοι παράγοντες οι οποίοι μπορεί να επηρεάσουν το αποτέλεσμα της δοκιμής αυτής και αναφέρονται στη βιβλιογραφία είναι:

- Οι βάσεις στις οποίες προσαρμόζονται τα δοκίμια θα πρέπει απαραίτητα να είναι ανοιχτές από την πίσω πλευρά ώστε να μη δημιουργείται αγωγίμο μονοπάτι ηλεκτρολύτη στο πίσω μέρος [4].
- Τα ηλεκτρόδια θα πρέπει να είναι πάντα σε άριστη κατάσταση. Γι' αυτό προτείνεται να αντικαθίστανται σε κάθε δοκιμή. Επίσης, θα πρέπει όταν πρόκειται για διεξαγωγή δοκιμών τα αποτελέσματα των οποίων θα χρησιμοποιηθούν για σύγκριση, να χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια μόνο από ένα κατασκευαστή για την πραγματοποίηση όλων των δοκιμών. Έχει διαπιστωθεί ότι η κατασκευαστική διαδικασία των ηλεκτροδίων επηρεάζει το αποτέλεσμα της δοκιμής [4, 86].
- Αναφορικά με την πηγή τάσης, αναφέρεται ότι εάν η εσωτερική σύνθετη αντίσταση της είναι πολύ μεγάλη ή εάν περιορίζει τον απαιτούμενο ρυθμό αύξησης του ρεύματος di/dt , τότε παράγονται υπερπηδήσεις πολύ μεγαλύτερες από αυτές του πραγματικού δικτύου [4].

Επειδή δεν υπάρχει Πρότυπο για τη δοκιμή αυτή το οποίο να αναφέρεται ακριβώς στο πως αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί σε δοκίμια που λαμβάνονται από συνθετικούς

μονωτήρες, γι' αυτό το λόγο υπάρχουν κάποιες αποκλίσεις από το Πρότυπο όσον αφορά τις διαστάσεις των δοκιμίων τα οποία λαμβάνονται απ' ευθείας από συνθετικούς μονωτήρες και δεν κατασκευάζονται επί τούτου για την εκτέλεση της δοκιμής. Τα δοκίμια αυτά από τους μονωτήρες λαμβάνονται είτε από το μονωτικό περίβλημα του μονωτήρα μετά από αφαίρεση των κυαθίων και προσαρμογή του στο κατάλληλο μέγεθος [4, 33, 80], είτε από τα ίδια τα κυάθια (συνήθως το μισό κυάθιο είναι αρκετό για τη δοκιμή) (σχήμα 2-6) [67, 81]. Έχει διαπιστωθεί ότι αυτά τα δοκίμια υφίστανται μεγαλύτερη καταπόνηση σε σχέση με τα δοκίμια που προδιαγράφει το Πρότυπο, καθώς συνήθως έχουν μικρότερο πάχος και πλάτος από εκείνα. Όμως αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα, καθώς τα δοκίμια που λαμβάνονται από μονωτήρες με πολύ καλά υλικά περνούν τη δοκιμή και υπό αυτές τις συνθήκες [29, 33]. Άλλη μία διαφοροποίηση από το Πρότυπο που έχει διερευνηθεί και προτείνεται είναι να χρησιμοποιούνται 15 [86] – 20 [87] δοκίμια ανά δοκιμή για περισσότερο αξιόπιστα αποτελέσματα.



α



β

Σχήμα 2-6. α) Δοκίμιο από το μονωτικό περίβλημα του μονωτήρα (sheath) [33], β) μισό κυάθιο ως δοκίμιο για τη δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου [67].

Επιπλέον, όταν η δοκιμή αυτή εφαρμόζεται σε δοκίμια που έχουν ληφθεί από συνθετικούς μονωτήρες συνηθίζεται να εφαρμόζεται η μέθοδος 1 του προτύπου, δηλαδή με σταθερή AC τάση στα 4,5kV για 6 ώρες συνεχόμενα [29, 81]. Υπάρχει βιβλιογραφική πηγή που υποστηρίζει ότι, όταν η δοκιμή εφαρμόζεται στο μονωτικό περίβλημα των συνθετικών μονωτήρων τότε αυτή θα πρέπει να εκτελείται στα 6 kV AC τάσης για διάρκεια 6 ωρών και όχι στα 4,5 kV [87]. Επίσης, έχει διαπιστωθεί μετά από πολλή έρευνα ότι το υλικό του μονωτικού περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων με την καλύτερη απόδοση στη δοκιμή του κεκλιμένου επιπέδου είναι το HTV (high temperature vulcanized) σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) με πρόσμιξη ATH (aluminium - trihydrate) και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία των συνθετικών μονωτήρων [82, 83, 85, 87,

88]. Ακόμη, στο αποτέλεσμα της δοκιμής παίζει ρόλο ο τύπος και το μέγεθος των σωματιδίων από το υλικό πρόσμιξης ATH [87].

Πέρα από τη δοκιμή που προδιαγράφεται στο Πρότυπο IEC 60587 [84] και η οποία γίνεται με AC τάση, έχει ξεκινήσει να γίνεται έρευνα για το αν θα πρέπει να εφαρμόζεται η συγκεκριμένη δοκιμή και με DC τάση, λόγω των όλο και περισσότερων αναγκών μεταφοράς ενέργειας σε πολύ μεγάλες αποστάσεις που γίνονται μέχρι και στα 800 kV DC [4, 85]. Συγκεκριμένα προς αυτήν την κατεύθυνση έχει γίνει έρευνα και ερευνητές σε όλο τον κόσμο έχουν προσπαθήσει να προτείνουν μια αντιστοιχία μεταξύ της δοκιμής σε AC τάση και αυτής σε DC τάση [89, 90]. Έχει βρεθεί ότι το επίπεδο της τάσης όταν εκτελείται η δοκιμή με DC τάση θα πρέπει να είναι: 70% της AC τάσης σε DC τάση θετικής πολικότητας και 90% της AC τάσης σε DC τάση αρνητικής πολικότητας, έτσι ώστε η ένταση της διάβρωσης στο υλικό να είναι περίπου η ίδια [91]. Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι όταν η δοκιμή πραγματοποιείται με DC τάση τότε είναι πολύ πιο έντονη η διάβρωση στη θετική πολικότητα DC, μετά στην αρνητική πολικότητα DC και μετά στο AC, καθώς επίσης και τα ρεύματα διαρροής είναι μεγαλύτερα (περίπου 3 φορές) σε σχέση με την περίπτωση της AC τάσης [85, 89, 90, 92].

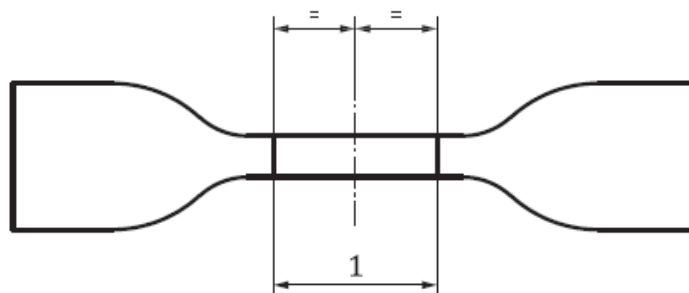
2.2.1.5 Δοκιμή εφελκυσμού και μέγιστης επιμήκυνσης (tensile strength and maximum elongation test)

Ο πιο συνηθισμένος τύπος μέτρησης στη βιομηχανία ελαστικών μετά τη μέτρηση της σκληρότητας είναι η μέτρηση της αντοχής εφελκυσμού και της μέγιστης επιμήκυνσης μέχρι τη στιγμή που σπάει το υλικό (ουσιαστικά το υλικό επιμηκώνεται και στο σημείο που κόβεται λόγω της επιμήκυνσης καταγράφεται η δύναμη στην οποία κόπηκε και η επιμήκυνση η οποία επετεύχθη μέχρι εκεί) [76, 78].

Η δοκιμή αυτή είναι πολύ σημαντικό να πραγματοποιείται στο μονωτικό περίβλημα των συνθετικών μονωτήρων που συνήθως είναι σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber). Με αυτή τη δοκιμή καθίσταται δυνατή η αναγνώριση ελαττωματικού υλικού εύκολα και γρήγορα (π.χ. λάθη κατά τη διαδικασία βουλκανισμού), καθώς και η εύρεση της επίδρασης του μεγέθους και του τύπου των σωματιδίων των πληρωτικών υλικών που χρησιμοποιούνται [4].

Η δοκιμή προσδιορισμού της αντοχής σε εφελκυσμό και της μέγιστης επιμήκυνσης μπορεί να γίνει σύμφωνα με το Πρότυπο ISO 37 [93]. Τα δοκίμια γι' αυτή τη δοκιμή πρέπει να

έχουν είτε το σχήμα «αλήτρα» είτε το σχήμα δαχτυλιδιού. Για την πραγματοποίηση της δοκιμής σε συνθετικούς μονωτήρες χρησιμοποιείται κυρίως το σχήμα αλήτρα [56]. Το σχήμα αλήτρα θα πρέπει να είναι όπως φαίνεται στο σχήμα 2-7 και να έχει τις διαστάσεις που καθορίζονται από το Πρότυπο. Το πλήθος των δοκιμίων τα οποία θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν είναι 3, αλλά αναφέρεται στο Πρότυπο ότι η χρήση 5 δοκιμίων εξασφαλίζει μικρότερη αβεβαιότητα στη μέτρηση [93].



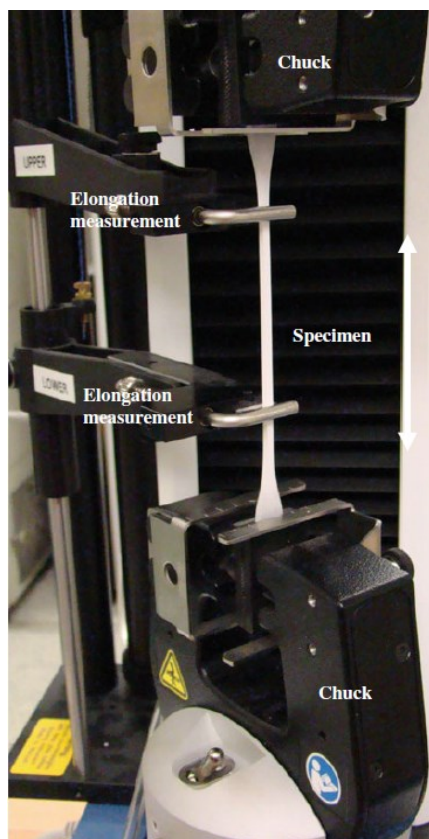
1 test length

Σχήμα 2-7. Δοκίμιο σε σχήμα «αλήτρα» [93].

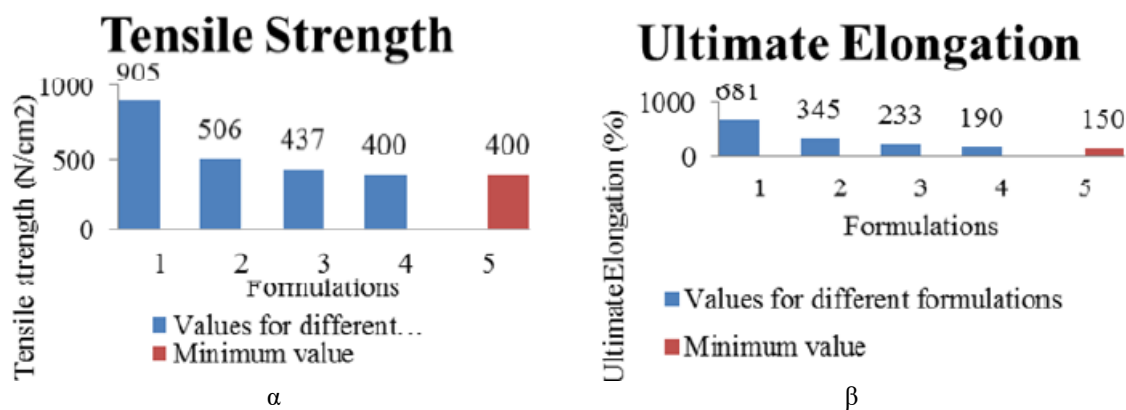
Πριν το δοκίμιο τοποθετηθεί στη συσκευή που θα κάνει τον εφελκυσμό θα πρέπει να ληφθούν τρεις μετρήσεις του πάχους του δοκιμίου: στο κέντρο του και στις δύο άκρες του μήκους δοκιμής (test length) που φαίνεται στο σχήμα 2-7. Έπειτα υπολογίζεται ο μέσος όρος της μέτρησης και είναι η τιμή που χρησιμοποιείται ως πάχος του δοκιμίου. Στη συνέχεια, το δοκίμιο τοποθετείται στη μηχανή εφελκυσμού δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στα δύο άκρα του δοκιμίου στα οποία σφίγγει η μηχανή (σχήμα 2-8). Θα πρέπει τα δύο άκρα του δοκιμίου να έχουν σφίγγει από τη μηχανή συμμετρικά. Στη συνέχεια τοποθετούνται στο δοκίμιο οι δύο βραχίονες που είναι για τη μέτρηση της επιμήκυνσης κατά τη διάρκεια της δοκιμής και εκτελείται η δοκιμή. Δοκίμια τα οποία σκίστηκαν (κόπηκαν) σε σημείο εκτός του μήκους δοκιμής (test length) δε λαμβάνονται υπόψιν (σχήμα 2-7). Τα θερμοκρασιακά εύρη στα οποία θα πρέπει να εκτελείται η δοκιμή είναι: $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ή $27 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, όπως αυτά αναφέρονται στο Πρότυπο ISO 23529 [60].

Αναφορικά με τη συνήθη πρακτική, που εφαρμόζεται από τους κατασκευαστές συνθετικών μονωτήρων, κατά την οποία προστίθεται στο βασικό υλικό του μονωτικού περιβλήματος, (δηλ. στο σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber)), το πληρωτικό υλικό aluminium trihydrate (ATH) για αυξημένη αντοχή στη δημιουργία αγωγίμων καναλιών άνθρακα και στη διάβρωση (tracking and erosion), έχει διαπιστωθεί ότι, όσο αυξάνεται η συγκέντρωση του υλικού της πρόσμιξης (ATH) μέσα στο σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber), τόσο

μειώνονται η αντοχή του σε εφελκυσμό (δηλαδή το υλικό σπάει με την άσκηση μικρότερης δύναμης) και η μέγιστη επιμήκυνση στην οποία σπάει (κόβεται), όπως φαίνεται στο σχήμα 2-9 [56]. Από την άλλη μεριά απαιτείται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αντοχή του υλικού σε εφελκυσμό, καθώς με αυτόν τον τρόπο αποτρέπονται ζημιές από τον άνεμο, την άμμο και τα τσιμπήματα των πτηνών, όταν οι μονωτήρες βρίσκονται εγκατεστημένοι στο ηλεκτρικό δίκτυο [94]. Οπότε, οι κατασκευαστές των συνθετικών μονωτήρων καλούνται να βρουν την κατάλληλη συγκέντρωση σε ΑΤΗ στην οποία το υλικό θα έχει καλή συμπεριφορά στο φαινόμενο δημιουργίας αγωγίμων καναλιών άνθρακα, αλλά ταυτόχρονα υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό. Επίσης, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία η τυπική ελάχιστη τιμή αντοχής σε εφελκυσμό που θα πρέπει να έχει το μονωτικό περίβλημα των συνθετικών μονωτήρων (high temperature vulcanized silicone rubber) είναι 3 [95] ή 4 [56] MPa ($=\text{N}/\text{mm}^2$) και η αντίστοιχη τυπική ελάχιστη τιμή για τη μέγιστη επιμήκυνση του υλικού, πριν αυτό σπάσει, εκφρασμένη σε ποσοστό είναι 150% [56].



Σχήμα 2-8. Μηχανή εφελκυσμού για την πραγματοποίηση της δοκιμής εφελκυσμού και μέγιστης επιμήκυνσης [4].



Σχήμα 2-9. α) Αντοχή σε εφελκυσμό και β) μέγιστη επιμήκυνση μέχρι τη θραύση των υλικών high temperature vulcanized (HTV) σιλικονούχου καουτσούκ (silicone rubber) με 1: 0% aluminium trihydte (ATH), 2: 40% ATH, 3: 50% ATH, 4: 60% ATH και 5: η ελάχιστη απαιτούμενη τιμή για α) την αντοχή σε εφελκυσμό και β) τη μέγιστη επιμήκυνση του υλικού του μονωτικού περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων [56].

Η συγκεκριμένη δοκιμή χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία των συνθετικών μονωτήρων για την ανάπτυξη νέων υλικών ή για την εξέλιξη των ήδη υπαρχόντων. Υπάρχουν αναφορές για υλικά πρόσμιξης που έχουν βρεθεί για να αντικαταστήσουν το πληρωτικό υλικό aluminium trihydrate (ATH) και τα οποία έχουν υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό, για παράδειγμα 6,5 MPa [96] και 5,4 MPa [97], σε σχέση με το σιλικονούχο καουτσούκ με προσμίξεις aluminium trihydrate (ATH). Επίσης έχει βρεθεί ότι, όταν προστεθεί σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) στο υλικό EPDM (υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του μονωτικού περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων, αλλά όχι όσο συχνά το silicone rubber), τότε αυτό εμφανίζει υψηλότερη αντοχή στον εφελκυσμό από ότι σε σύγκριση με όταν είναι σκέτο EPDM [98]. Άλλοι ερευνητές πρότειναν την πολυολεφίνη ως νέο υλικό για τα κιάτσια των συνθετικών μονωτήρων με σκοπό να αντικαταστήσει το σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) καθώς μεταξύ άλλων ιδιοτήτων παρατήρησαν για την αντοχή σε εφελκυσμό ότι μπορεί να φτάσει τα 21 MPa, τη στιγμή που το σιλικονούχο καουτσούκ είναι κοντά στα 4,5 MPa [94].

Στη βιβλιογραφία αναφορικά με το συγκεκριμένο θέμα υπάρχουν διαφορετικές απόψεις σχετικά με το πως η γήρανση επηρεάζει την αντοχή του υλικού σε εφελκυσμό. Μια έρευνα έδειξε ότι, κομμάτια συνθετικού μονωτήρα από βουλκανισμένο σε υψηλή θερμοκρασία (high temperature vulcanized - HTV) σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber), τα οποία τοποθετήθηκαν σε θάλαμο γήρανσης για 5000 ώρες και υφίσταντο θερινούς και χειμερινούς κύκλους γήρανσης με εφαρμογή σε αυτούς ηλεκτρικής τάσης, υπεριώδους ακτινοβολίας, μεταβολές σε θερμοκρασία και υγρασία, όξινη βροχή και ομίχλη άλατος, εμφάνισαν μετά τις 5000 ώρες γήρανσης χαμηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό και μικρότερη

μέγιστη επιμήκυνση πριν τη θραύση [99]. Από την άλλη πλευρά, μια έρευνα που έγινε σε κομμάτια συνθετικού μονωτήρα από high temperature vulcanized (HTV) σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber), στα οποία ασκήθηκε τεχνητή γήρανση τοποθετώντας τα μέσα σε φούρνο, σε υψηλή θερμοκρασία, παρατηρήθηκε ότι η αντοχή τους σε εφελκυσμό ήταν μεγαλύτερη από ότι στην αρχή [100]. Επίσης, σε μια τρίτη έρευνα παρατηρήθηκε ότι τα κομμάτια HTV silicone rubber των συνθετικών μονωτήρων, που υποβλήθηκαν σε τεχνητή γήρανση με ηλεκτρική τάση, με μεταβολές θερμοκρασίας-υγρασίας, με ρύπανση και με υπεριώδη ακτινοβολία, παρουσίασαν μεγαλύτερη μέγιστη επιμήκυνση πριν σπάσουν σε σχέση με τα αρχικά δοκίμια (πριν τη γήρανση) [101].

2.2.1.6 Δοκιμή προσδιορισμού της αντοχής σε σκίσιμο (Determination of tear strength)

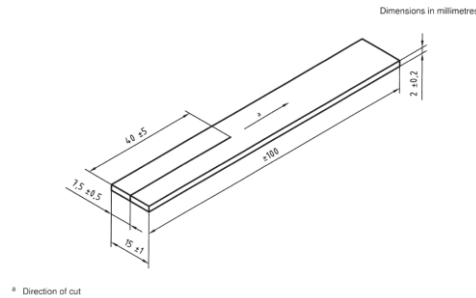
Η δοκιμή για τον προσδιορισμό της αντοχής του μονωτικού περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων σε σκίσιμο αποτελεί άλλη μία πολύ σημαντική και χρήσιμη δοκιμή για τη βιομηχανία των συνθετικών μονωτήρων, καθώς χρησιμοποιείται για την περαιτέρω ανάπτυξη και την επίτευξη καλύτερων ιδιοτήτων στο μονωτικό περίβλημα είτε αυτό είναι το πλέον χρησιμοποιούμενο στους συνθετικούς μονωτήρες σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber), είτε είναι το λιγότερο χρησιμοποιούμενο EPDM rubber (ethylene propylene diene monomer rubber) [102, 103].

Για τη διεξαγωγή της δοκιμής αυτής χρησιμοποιείται το Πρότυπο ISO 34-1 [104]. Σύμφωνα με το Πρότυπο αυτό υπάρχουν 3 μέθοδοι για τον προσδιορισμό της αντοχής των ελαστικών σε σκίσιμο. Αυτές είναι:

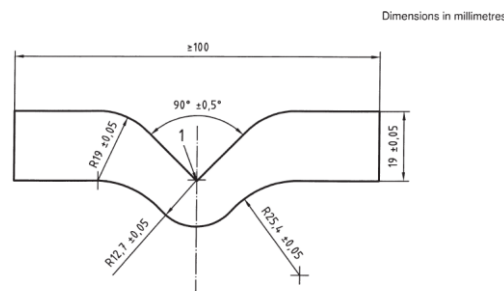
- Μέθοδος Α, χρησιμοποιώντας δοκίμιο «trouser», όπως φαίνεται στο σχήμα 2-10. Αυτή η μέθοδος προτιμάται συνήθως, καθώς το αποτέλεσμα της δεν εξαρτάται από το μήκος του αρχικού κοψίματος που θα πρέπει να έχει το δοκίμιο, ενώ οι άλλες δύο μέθοδοι εξαρτώνται πολύ από την ποιότητα της εγκοπής η οποία θα πρέπει να έχει γίνει πολύ προσεκτικά.
- Μέθοδος Β, χρησιμοποιώντας δοκίμιο «angle», με εγκοπή $1,0 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$, ή χωρίς, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-11 (η εγκοπή συμβολίζεται με τον αριθμό 1). Όταν η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται χωρίς την εγκοπή, ασκείται δύναμη στη γωνία του δοκιμίου ώστε να προκύψει μια μικρή σχισμή και στη συνέχεια ασκείται επιπλέον δύναμη μέχρις ότου το δοκίμιο να σκιστεί τελείως. Όταν εφαρμόζεται με την εγκοπή, τότε την αρχική

σχισμή την αποτελεί η εγκοπή και αυτή η δοκιμή μετράει τη δύναμη μέχρι να σκιστεί το δοκίμιο στο σημείο της εγκοπής.

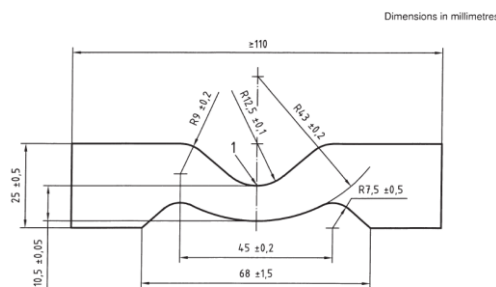
- Μέθοδος Γ, χρησιμοποιώντας δοκίμιο «crescent», με εγκοπή $1,0 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-12 (η εγκοπή συμβολίζεται με τον αριθμό 1). Η δοκιμή αυτή επίσης μετράει τη δύναμη μέχρι να σκιστεί το δοκίμιο στο σημείο της εγκοπής [104].



Σχήμα 2-10. Δοκίμιο «trouser» [104].



Σχήμα 2-11. Δοκίμιο «angle» [104].



Σχήμα 2-12. Δοκίμιο «crescent» [104].

Ακόμη στο Πρότυπο ISO 34-1 [104] αναφέρονται λεπτομερείς οδηγίες για το πώς θα πρέπει να γίνει η εγκοπή στα δοκίμια όποτε αυτή απαιτείται (συνήθως γίνεται με μεταλλικά καλούπια με κοφτερές άκρες) και για τις απαιτήσεις που θα πρέπει να πληροί η συσκευή με την οποία θα πραγματοποιηθεί αυτή η δοκιμή. Από τη στιγμή που θα γίνει η εγκοπή στο δοκίμιο, δε θα πρέπει να περάσουν παραπάνω από 24 ώρες μέχρι τη στιγμή που θα πραγματοποιηθεί η δοκιμή [104].

Η δοκιμή αυτή εκτελείται σε θερμοκρασία ($23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) ή ($27 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) και εάν πρόκειται να γίνουν δοκιμές των οποίων τα αποτελέσματα θα χρησιμοποιηθούν μετά για συγκρίσεις, θα πρέπει να πραγματοποιηθούν στην ίδια θερμοκρασία [104].

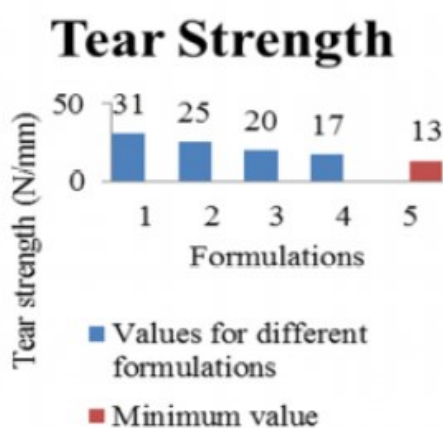
Η διαδικασία που ακολουθείται σε αυτή τη δοκιμή είναι η παρακάτω: αρχικά μετράται το πάχος του δοκιμίου στο σημείο στο οποίο αναμένεται να γίνει το σκίσιμο (το σημείο της εγκοπής, στις περιπτώσεις δοκιμών που υπάρχει εγκοπή), στη συνέχεια το δοκίμιο προσαρμόζεται στη συσκευή και με σταθερά αυξανόμενη δύναμη τραβιούνται τα δύο άκρα, μέχρις ότου να συμβεί το σκίσιμο. Καταγράφεται η δύναμη στην οποία συνέβη το σκίσιμο. Η δοκιμή εκτελείται σε 5 δοκίμια τουλάχιστον από το ίδιο υλικό [104]. Στο σχήμα 2-13 φαίνεται η διεξαγωγή της δοκιμής με δοκίμιο «trouser» [105].



Σχήμα 2-13. Διεξαγωγή της δοκιμής προσδιορισμού της αντοχής σε σκίσιμο σε συνθετικό μονωτήρα με δοκίμιο τύπου «trouser» [105].

Κατά το σχεδιασμό και την ανάπτυξη του υλικού του μονωτικού περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων είναι επιθυμητό η αντοχή του υλικού αυτού σε σκίσιμο να είναι μεγάλη. Αυτό συμβαίνει γιατί έχει παρατηρηθεί ότι, συνθετικοί μονωτήρες που ήταν στο ηλεκτρικό δίκτυο υπέστησαν φθορές (σκισίματα) στα κιάθια τους εξαιτίας ισχυρών ανέμων που επικρατούσαν στην περιοχή [106, 107], καθώς επίσης και εξαιτίας τσιμημάτων των πτηνών της περιοχής εγκατάστασης τους [108]. Ακόμη ένας λόγος που απαιτείται υψηλή αντοχή σε σκίσιμο είναι ότι με αυτόν τον τρόπο το υλικό του μονωτικού περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων μπορεί να είναι περισσότερο ανθεκτικό κατά το χειρισμό (handling) στα πλαίσια της κατασκευαστικής διαδικασίας ή / και κατά την μεταφορά - εγκατάσταση των μονωτήρων στο ηλεκτρικό δίκτυο [109]. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι η ελάχιστη απαιτούμενη αντοχή σε σκίσιμο του μονωτικού περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων θα πρέπει να είναι 6 [4] ή 7 [110] ή 13 N/mm [56].

Έχει παρατηρηθεί ότι, η ανάγκη για προσθήκη του υλικού aluminium trihydrate (ATH) ως πληρωτικό υλικό στο σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber), ώστε το τελευταίο να έχει μεγαλύτερη αντίσταση στη δημιουργία αγωγίμων καναλιών άνθρακα και διάβρωσης (tracking and erosion) έρχεται σε αντίθεση με την ανάγκη για υψηλή αντοχή σκίσιματος του υλικού, καθώς όσο αυξάνεται η συγκέντρωση του ATH στο σιλικονούχο καουτσούκ, τόσο μειώνεται η αντοχή του στο σκίσιμο. Βέβαια, διατηρείται στα επιθυμητά επίπεδα με την κατάλληλη συγκέντρωση ATH, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-14 [56, 111]. Επίσης, υπάρχουν αναφορές ερευνητών οι οποίοι έχουν ερευνήσει άλλα υλικά, τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως πρόσθετα στο σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) και παρατήρησαν ότι με αυτά τα πληρωτικά υλικά επιτυγχανόταν καλύτερη αντοχή στο σκίσιμο από ότι με το ATH [71, 96].



Σχήμα 2-14. Αντοχή σε σκίσιμο των υλικών high temperature vulcanized (HTV) σιλικονούχου καουτσούκ (silicone rubber) με 1: 0% aluminium trihydrate (ATH), 2: 40% ATH, 3: 50% ATH, 4: 60% ATH και 5: η ελάχιστη απαιτούμενη τιμή για την αντοχή σε σκίσιμο του υλικού του μονωτικού περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων [56].

Τέλος, έρευνα έχει γίνει σχετικά με τη σχέση που έχει η αντοχή στο σκίσιμο του σιλικονούχου καουτσούκ (silicone rubber) των συνθετικών μονωτήρων με τη γήρανση που αυτό έχει υποστεί. Υπάρχουν αναφορές από δοκιμές που έχουν γίνει σε συνθετικούς μονωτήρες που έχουν αποξηλωθεί από το δίκτυο μετά από 3 έως και περισσότερα από 15 χρόνια λειτουργίας οι οποίες αναφέρουν ότι η αντοχή του μονωτικού περιβλήματος σε σκίσιμο μειώνεται με το πέρασμα των χρόνων υπό φυσικές συνθήκες γήρανσης. Μάλιστα έχει αναφερθεί ότι η αντοχή του μονωτικού περιβλήματος σε σκίσιμο μπορεί να πέσει κάτω από τα ανεκτά επίπεδα σε μόλις 6 χρόνια λειτουργίας στο δίκτυο [105, 109]. Αντίθετα, αναφέρεται σε άλλη πηγή ότι, μετά από 15 χρόνια στο ηλεκτρικό δίκτυο δεν παρατηρήθηκε αξιοσημείωτη διαφορά στην αντοχή σε σκίσιμο του μονωτικού περιβλήματος [112].

2.2.1.7 Φασματοσκοπία υπέρυθρων μετασχηματισμού Fourier (*Fourier transform infrared spectroscopy – FTIR*)

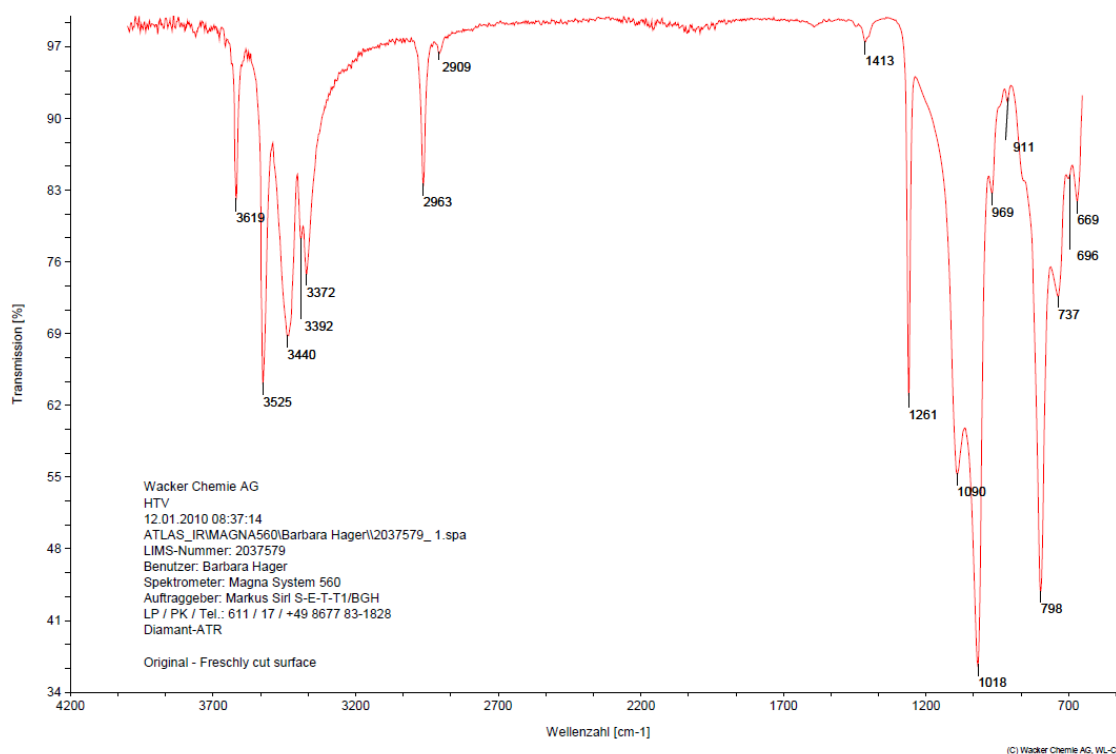
Η φασματοσκοπία υπέρυθρων είναι άλλη μία πολύ σημαντική δοκιμή στη βιομηχανία των συνθετικών μονωτήρων, με την οποία μπορούν να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με το αν υπάρχουν ή δεν υπάρχουν στο υλικό συγκεκριμένες λειτουργικές χημικές ομάδες κάποιων υλικών που έχουν σημασία για τις ιδιότητες του υλικού του μονωτικού περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων [90]. Ουσιαστικά, με τη δοκιμή αυτή στο μονωτικό περίβλημα των συνθετικών μονωτήρων μπορεί να γίνει προσδιορισμός της χημικής δομής του πολυμερούς υλικού (πολυμερές και πληρωτικά υλικά) [113].

Για αυτή τη δοκιμή δεν υπάρχει συγκεκριμένο Πρότυπο, αλλά μια πολύ κατατοπιστική τεχνική οδηγία της Cigre η 595 [113]. Η δοκιμή αυτή χρησιμοποιείται για να παραχθεί ένα φάσμα του υλικού το οποίο στη συνέχεια μπορεί να αντιστοιχιστεί με βιβλιοθήκες γνωστών δειγμάτων ή υλικών αναφοράς. Σε αυτή τη δοκιμή το δοκίμιο εκτίθεται σε υπέρυθη ακτινοβολία και απορροφά εκείνες τις συχνότητες οι οποίες ταιριάζουν με τις συχνότητες δόνησης των ατόμων του. Η ενέργεια της κάθε μοριακής δόνησης είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στο χημικό περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται ένα μόριο, παρέχοντας πληροφορίες για τον τύπο του πολυμερούς και τη σύνθεσή του. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα μοριακό αποτύπωμα (ένα φάσμα) του υλικού. Η φασματοσκοπία υπέρυθρων είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την αναγνώριση οργανικών ενώσεων, όπως πολυμερή και προσθετικά υλικά, αλλά σε μερικές περιπτώσεις χρησιμοποιείται και για τον καθορισμό ανόργανων ενώσεων, όπως τα ανόργανα πληρωτικά υλικά και τα επιβραδυντικά φλόγας [113, 114]. Επίσης, μπορεί να δώσει ποιοτικά αλλά και ποσοτικά αποτελέσματα [114].

Για τη διεξαγωγή της δοκιμής φασματοσκοπίας υπέρυθρων χρησιμοποιείται ένα κλασικό φασματόμετρο υπέρυθρης απορρόφησης, του οποίου το φάσμα υπέρυθρων πρέπει να λειτουργεί σε λειτουργία ανάκλασης (από 600 έως 4000 cm^{-1}) [113].

Παρατίθενται στη συνέχεια κάποια τυπικά παραδείγματα εφαρμογής της φασματοσκοπίας υπέρυθρων στα πιο συνηθισμένα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται ως μονωτικό περίβλημα των συνθετικών μονωτήρων και γίνεται αντιστοιχία των κορυφών των φασμάτων με τις αντίστοιχες χημικές ενώσεις και με τα υλικά που αντιπροσωπεύουν.

Αρχικά στο σχήμα 2-15 δίνεται το φάσμα που προκύπτει από το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο υλικό για τα μονωτικά περιβλήματα των συνθετικών μονωτήρων, το σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) με πρόσμιξη πληρωτικού υλικού aluminium trihydrate (ATH).



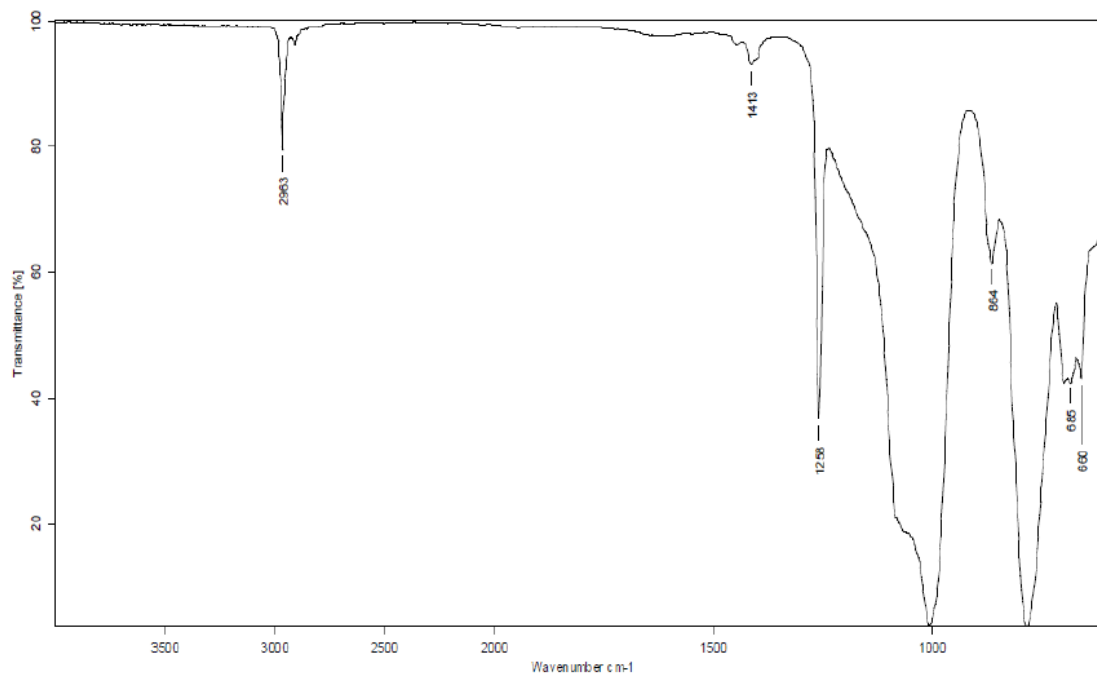
Σχήμα 2-15. Υπέρυθρο φάσμα του σιλικονούχου καουτσούκ (silicone rubber) με πρόσμιξη ATH [113].

Στον πίνακα 2-2 δίνεται η αντιστοιχία κάποιων από τις κορυφές που φαίνονται στο σχήμα 2-15 με τους χημικούς δεσμούς ή τα υλικά στα οποία αντιστοιχούν.

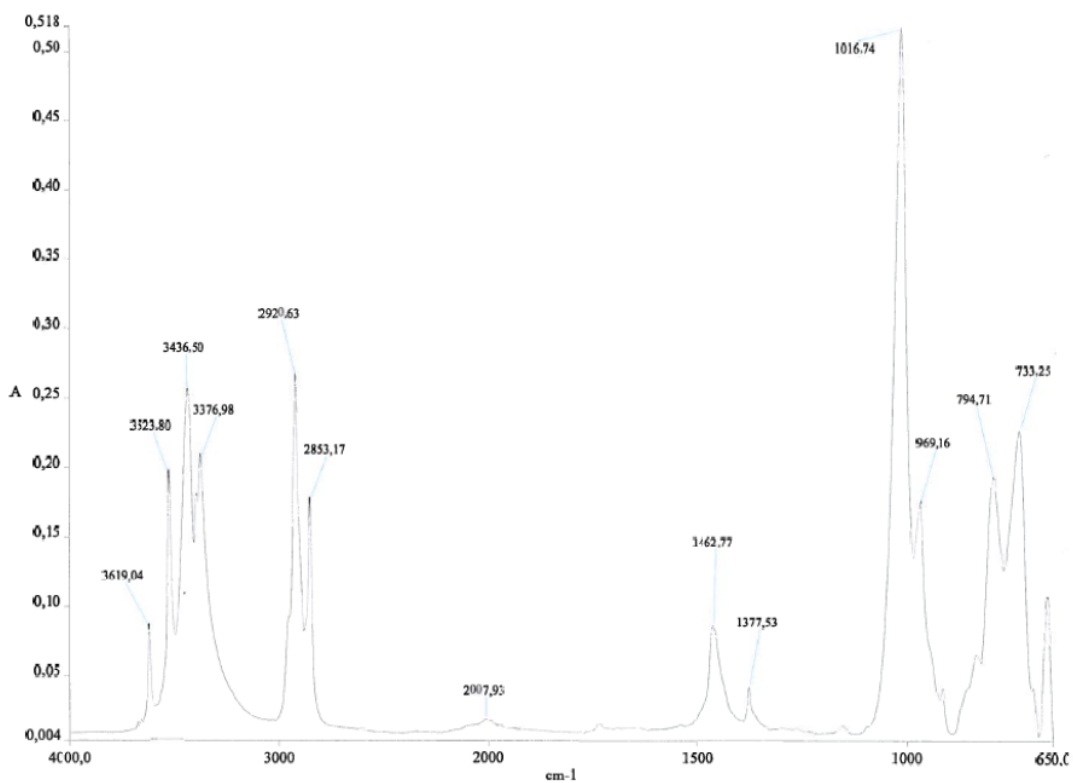
Πίνακας 2-2. Κορυφές του σχήματος 2-15 και αντίστοιχοι χημικοί δεσμοί ή υλικά του μονωτικού υλικού [81, 113, 115].

Χημικός δεσμός ή υλικό	Κυματαριθμός (cm ⁻¹)
Aluminium trihydrate (ATH)	3650-3300
CH ₃	2963-2960
Si-CH ₃	1280-1240
Si-O	1100-1000
Si-(CH ₃) ₂	840-790

Στα σχήματα 2-16 και 2-17 δίνονται τα αντίστοιχα φάσματα για δύο άλλα, πιο σπάνια χρησιμοποιούμενα, υλικά του μονωτικού περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων.



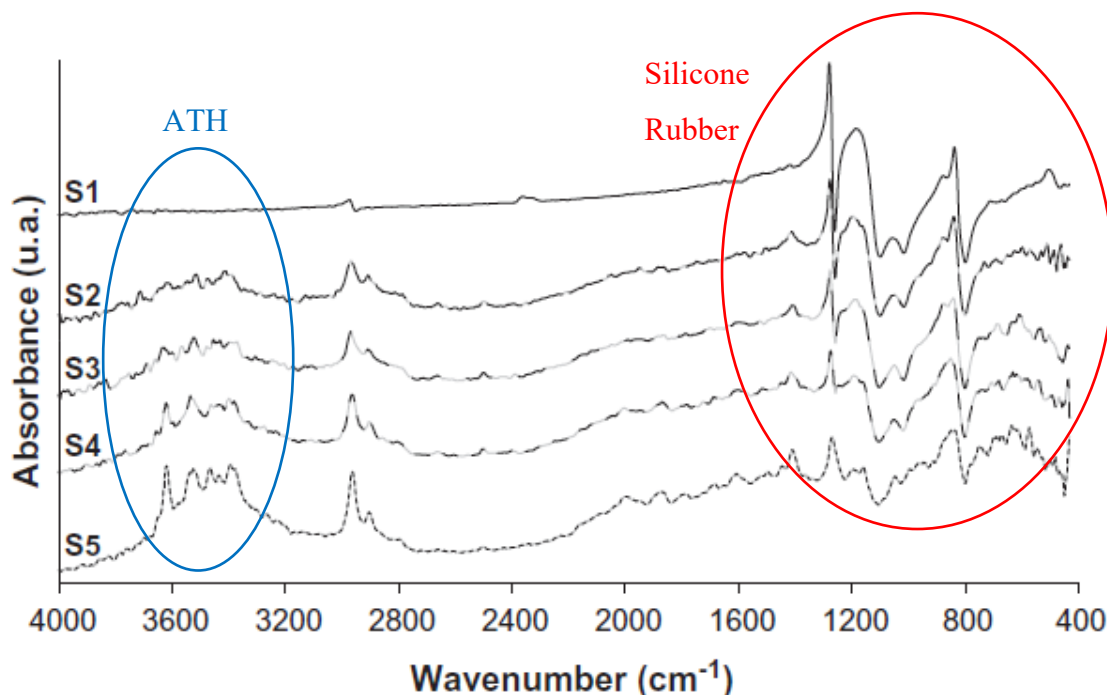
Σχήμα 2-16. Υπέρυθρο φάσμα του μονωτικού υλικού Liquid Silicone Rubber (LSR) [113].



Σχήμα 2-17. Υπέρυθρο φάσμα του μονωτικού υλικού EPDM rubber με προσμίξεις ATH (ethylene propylene diene monomer rubber) [113].

Από τα σχήματα 2-15, 2-16, 2-17 φαίνεται ότι η δοκιμή φασματοσκοπίας υπέρυθρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να γίνει αντιληπτό από τι υλικό είναι κατασκευασμένος ο συνθετικός μονωτήρας, αλλά και τι πρόσθετα υλικά περιέχει.

Η συγκεκριμένη δοκιμή είναι ικανή να δώσει ποσοτική πληροφορία π.χ. για την ποσότητα πληρωτικού υλικού aluminium trihydrate (ATH) που περιέχει ένας συνθετικός μονωτήρας μέσα στο σιλικονούχο καουτσούκ του (silicone rubber), όπως φαίνεται στο σχήμα 2-18 [111].



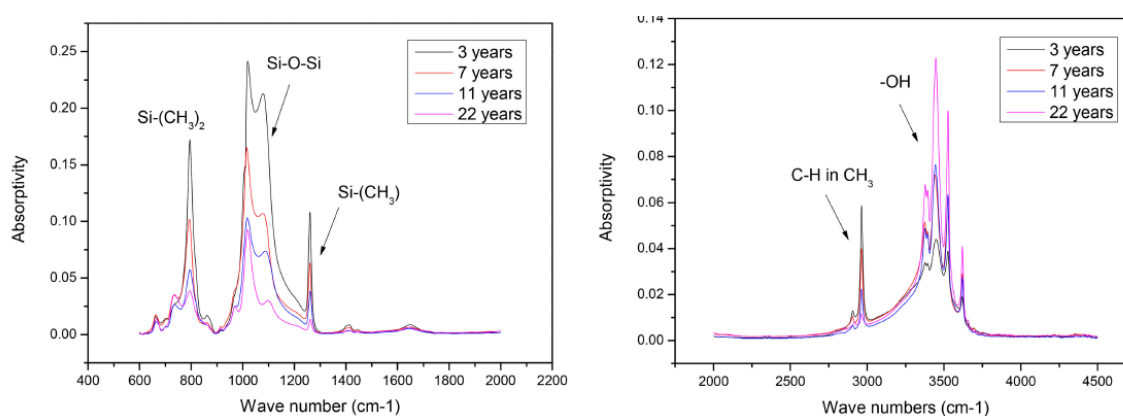
Σχήμα 2-18. Φάσματα του μονωτικού υλικού high temperature vulcanized (HTV) σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) με διαφορετικές συγκεντρώσεις πληρωτικού υλικού aluminium trihydrate (ATH). S1: 0 μέρη ATH, S2: 25 μέρη ATH, S3: 50 μέρη ATH, S4: 75 μέρη ATH, S5: 100 μέρη ATH. Ο μπλε κύκλος αντιστοιχεί στο υλικό ATH και ο κόκκινος στο silicone rubber [111].

Για τη σωστή παρατήρηση του σχήματος 2-18 πρέπει να δοθεί προσοχή στο ότι ο κατακόρυφος άξονας δεν έχει μονάδες και οι καμπύλες S1 – S5 έχουν τοποθετηθεί η μία πάνω από την άλλη για καλύτερη εποπτεία. Παρατηρώντας τις γραφικές S1 – S5 βλέπουμε ότι στον μπλε κύκλο (ATH) αυξάνονται οι κορυφές καθώς αυξάνεται το υλικό ATH, ενώ στον κόκκινο κύκλο (silicone rubber) μειώνονται οι κορυφές καθώς πάμε από το υλικό με καθόλου ATH προς το υλικό με το περισσότερο ATH [111].

Επιπλέον, η δοκιμή αυτή είναι πολύ χρήσιμη για τη μελέτη των συνθετικών μονωτήρων, καθώς μπορεί να δώσει πληροφορία για το βαθμό γήρανσης του μονωτικού υλικού (σιλικονούχο καουτσούκ). Υπάρχουν αναφορές στη βιβλιογραφία, όπου και με φυσική,

αλλά και με τεχνητή γήρανση παρατηρήθηκε μείωση στις κορυφές του φάσματος υπέρυθρων του υλικού, καθώς αυξανόταν η γήρανση του σε σχέση με το καινούριο υλικό [64, 68, 116, 117].

Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα 2-19, όπου φαίνονται τα φάσματα υπέρυθρων για το μονωτικό περίβλημα, από σιλικονούχο καουτσούκ με πρόσμιξη aluminium trihydrate (ATH), συνθετικών μονωτήρων που αποξηλώθηκαν από το ηλεκτρικό δίκτυο της Κίνας μετά από 3, 7, 11 και 22 χρόνια λειτουργίας. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2-19 καθώς αυξάνεται η γήρανση των μονωτήρων παρατηρείται μια μείωση στις κορυφές των φασμάτων υπέρυθρων τους [118].



Σχήμα 2-19. Φάσματα υπέρυθρων μονωτικού περιβλήματος, από σιλικονούχο καουτσούκ με πρόσμιξη aluminium trihydrate (ATH), συνθετικών μονωτήρων έπειτα από 3, 7, 11 και 22 χρόνια λειτουργίας στο ηλεκτρικό δίκτυο της Κίνας [118].

Τέλος, αναφέρεται ότι, η δοκιμή φασματοσκοπίας υπέρυθρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την ανάλυση του υλικού της ράβδου (πλαστικό ενισχυμένο με υαλονήματα glass fiber reinforced plastic) των συνθετικών μονωτήρων, αλλά σε αυτή τη διδακτορική διατριβή η συγκεκριμένη περίπτωση δε θα διερευνηθεί [119, 120].

2.2.1.8 Θερμοβαρυστική ανάλυση (Thermogravimetric analysis – TGA)

Η θερμοβαρυστική ανάλυση (Thermogravimetric analysis – TGA) είναι ακόμη μία σημαντική και χρήσιμη δοκιμή στη βιομηχανία των συνθετικών μονωτήρων. Σκοπός αυτής της δοκιμής είναι ο καθορισμός της θερμικής σταθερότητας, του τύπου και της ποσότητας των πτητικών και πληρωτικών υλικών που υπάρχουν μέσα σε ένα υλικό [113].

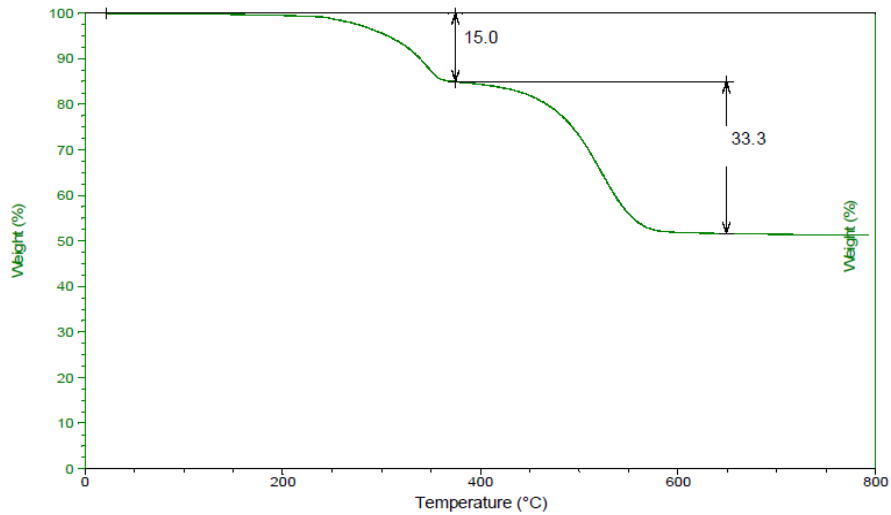
Η θερμοβαρυστική ανάλυση μετρά την ποσοστιαία απώλεια βάρους ενός δείγματος, ενώ το δείγμα θερμαίνεται με ομοιόμορφο ρυθμό σε κατάλληλο περιβάλλον. Η απώλεια βάρους σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες παρέχει ένδειξη της σύνθεσης του δείγματος,

συμπεριλαμβανομένων των πτητικών και των αδρανών πληρωτικών του, καθώς και ενδείξεις θερμικής σταθερότητας [113].

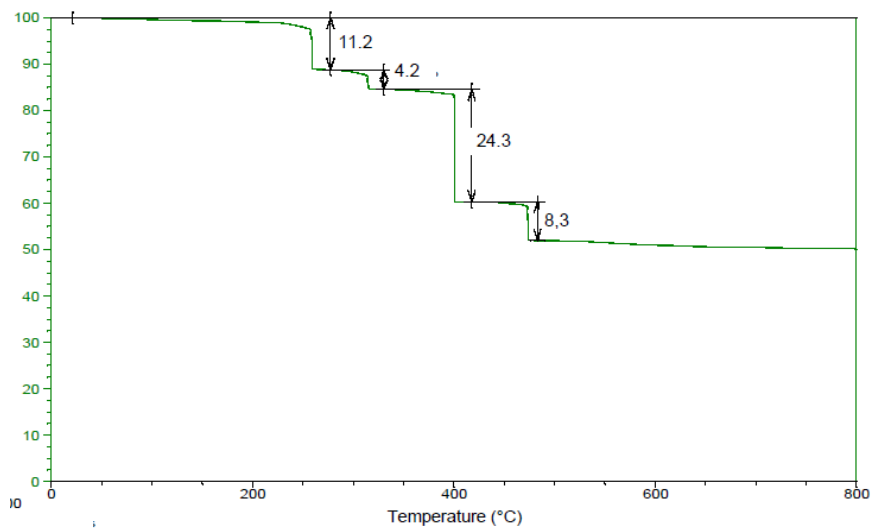
Στους συνθετικούς μονωτήρες η δοκιμή αυτή εφαρμόζεται στο υλικό του μονωτικού περιβλήματος σύμφωνα με τη διαδικασία που αναγράφεται στο Πρότυπο ISO 11358-1 [121]. Επίσης, ως βοηθητικός οδηγός για την εκτέλεση αυτής της δοκιμής συγκεκριμένα σε συνθετικούς μονωτήρες μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τεχνική οδηγία της Cigre με αριθμό 595 [113]. Σύμφωνα με το Πρότυπο [121] και με την τεχνική οδηγία [113] υπάρχουν δύο διαδικασίες οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν, ώστε να πραγματοποιηθεί η δοκιμή αυτή στο υλικό του μονωτικού περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων. Αυτές είναι: η συμβατική διαδικασία, όπου η θερμοκρασία αυξάνεται συνεχώς και δε γίνεται διατήρηση της θερμοκρασίας κατά τις φάσεις αποσύνθεσης του υλικού (σχήμα 2-20-α) και η πολυεπίπεδη διαδικασία, κατά την οποία η θερμοκρασία σταματά να αυξάνεται, όταν συμβαίνει μια φάση αποσύνθεσης του υλικού η οποία συνοδεύεται από απώλεια βάρους, (ισοθερμική διαδικασία), έως ότου ολοκληρωθεί η φάση αποσύνθεσης. Στη συνέχεια, η θερμοκρασία ξεκινά να αυξάνεται πάλι με σταθερό ρυθμό (σχήμα 2-20-β).

Το δοκίμιο θα πρέπει να κοπεί σε κατάλληλο μέγεθος από το προς εξέταση υλικό, ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί στη συσκευή με την οποία θα εκτελεστεί η δοκιμή. Το Πρότυπο αναφέρει ότι η μάζα του δοκιμίου θα πρέπει να είναι στην περιοχή: 10 – 100 mg [121], ενώ η τεχνική οδηγία αναφέρει ότι το δοκίμιο θα πρέπει να έχει μάζα στο εύρος: 15 ± 5 mg [113]. Επίσης, η δοκιμή θα πρέπει να εκτελείται σε 2 δοκίμια από το κάθε υλικό για λόγους επαναληψιμότητας [113]. Το αέριο το οποίο θα υπάρχει στο θάλαμο της δοκιμής είναι το άζωτο (N_2), η θερμοκρασία έναρξης της δοκιμής είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ($20 - 23^\circ C$) και η θερμοκρασία λήξης της δοκιμής είναι $700^\circ C$ [113] – $1000^\circ C$ [4]. Τέλος, ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας συνιστάται να είναι 20 K/min [113].

Το αποτέλεσμα της δοκιμής αυτής (συμβατική διαδικασία) όταν εκτελείται σε high temperature vulcanized σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) με πρόσμιξη υλικού aluminium trihydrate (ATH), που είναι το πλέον διαδεδομένο υλικό του μονωτικού περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων είναι ένα γράφημα σαν αυτό που φαίνεται στο σχήμα 2-21.

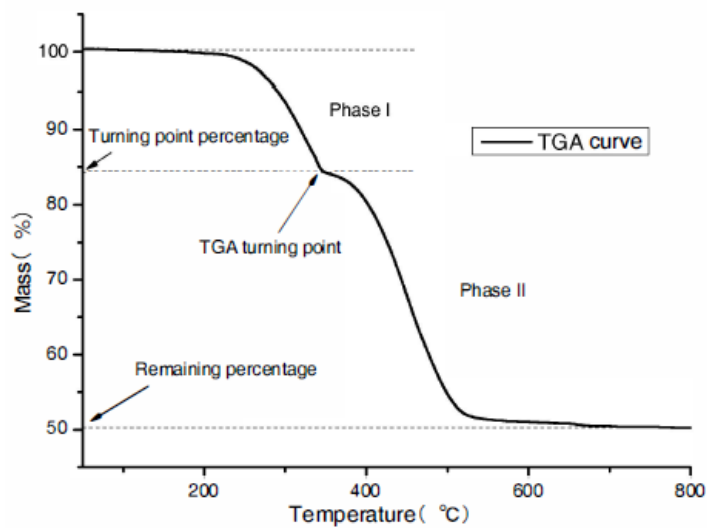


α



β

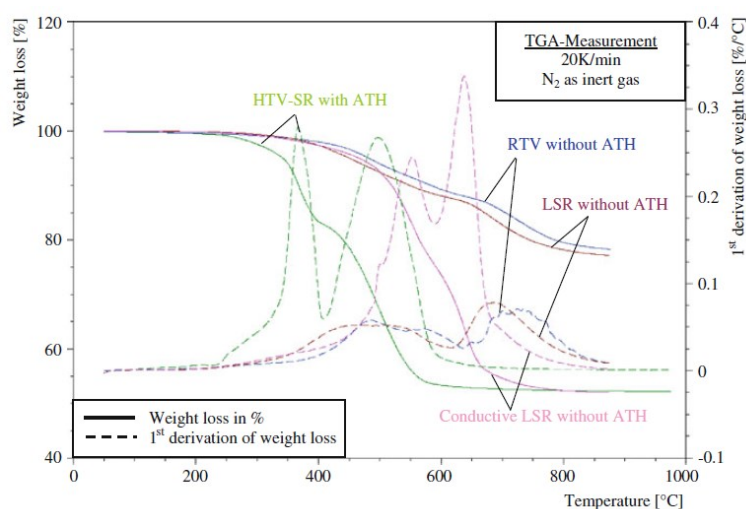
Σχήμα 2-20. α) Συμβατική διαδικασία της θερμοβαρμετρικής ανάλυσης, β) πολυεπίπεδη διαδικασία της θερμοβαρμετρικής ανάλυσης [113].



Σχήμα 2-21. Τυπική μορφή καμπύλης θερμοβαρμετρικής ανάλυσης για το υλικό: high temperature vulcanized σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) με πρόσμιξη aluminium trihydrate (ATH) [122].

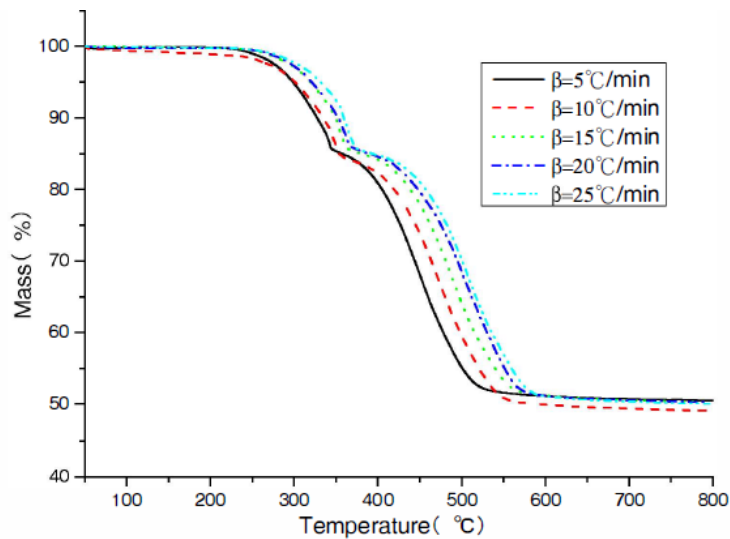
Όπως φαίνεται στο σχήμα 2-21 η καμπύλη αυτή περιλαμβάνει δύο φάσεις: η πρώτη φάση είναι αυτή που ξεκινάει σε θερμοκρασία περίπου 230 °C και αντιπροσωπεύει την αποσύνθεση του πληρωτικού υλικού aluminium trihydrate (ATH), δηλαδή την απώλεια βάρους του δοκιμίου λόγω της απώλειας νερού από το υλικό aluminium trihydrate (ATH). Η δεύτερη φάση ξεκινάει από τη θερμοκρασία των περίπου 350 °C και αντιπροσωπεύει την αποσύνθεση του πολυδιμέθυλοσιλοξανίου (PDMS), δηλαδή την πυρόλυση του [100, 101, 113, 122]. Για καλύτερη κατανόηση των παραπάνω αναφέρεται ότι το υλικό high temperature vulcanized (HTV) σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) είναι ένα μείγμα από οργανικές ενώσεις, όπως το πολυδιμέθυλοσιλοξάνιο (PDMS) και από ανόργανα πρόσθετα υλικά όπως το silica και το aluminium trihydrate (ATH). Αυτά τα τρία στοιχεία αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του σιλικονούχου καουτσούκ (silicone rubber) [123].

Η θερμοβαρυμετρική ανάλυση του υλικού είναι επίσης σημαντική, καθώς μπορεί κανείς να ξεχωρίσει από τις γραφικές παραστάσεις τι είδους είναι το εξεταζόμενο υλικό και για παράδειγμα οι αγοραστές συνθετικών μονωτήρων μπορούν να επαληθεύσουν, εάν είναι το υλικό το οποίο παρήγγειλαν ή ο κατασκευαστής έχει χρησιμοποιήσει διαφορετικό υλικό. Στο σχήμα 2-22 φαίνονται κάποιες αντιπροσωπευτικές καμπύλες της θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης για τα υλικά: high temperature vulcanized σιλικονούχο καουτσούκ (HTV silicone rubber) με πρόσμιξη υλικού aluminium trihydrate (ATH) (που χρησιμοποιείται πλέον συνηθέστερα στους συνθετικούς μονωτήρες), room temperature vulcanized σιλικονούχο καουτσούκ (RTV silicone rubber) χωρίς πρόσμιξη υλικού aluminium trihydrate και του Liquid Silicone Rubber (LSR) [4].

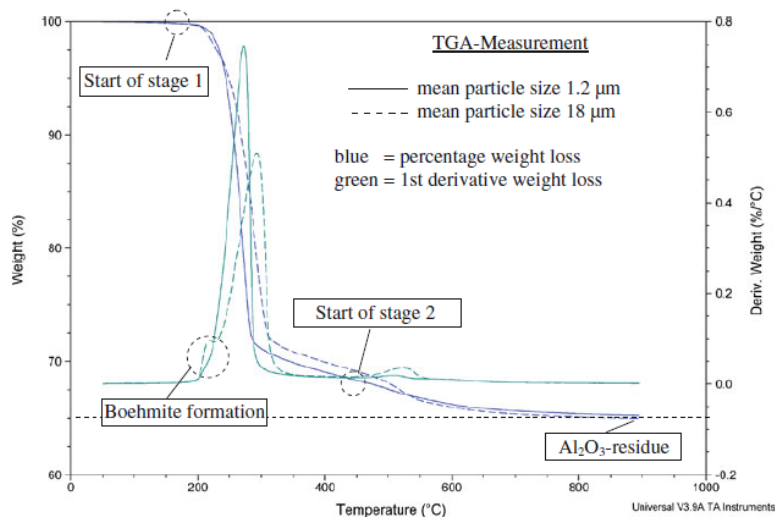


Σχήμα 2-22. Θερμοβαρυμετρική ανάλυση για διάφορους τύπους σιλικονούχου καουτσούκ που χρησιμοποιούνται στους συνθετικούς μονωτήρες [4].

Έχει παρατηρηθεί ότι ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας που επιλέγεται κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της δοκιμής, έχει ως αποτέλεσμα να είναι διαφορετική η εξαγόμενη γραφική παράσταση. Συγκεκριμένα, όσο πιο μικρός ο ρυθμός αύξησης σε τόσο μικρότερη θερμοκρασία συμβαίνουν οι φάσεις αποσύνθεσης του high temperature vulcanized σιλικονούχου καουτσούκ (silicone rubber) με πρόσμιξη υλικού aluminium trihydrate (ATH), όπως φαίνεται στο σχήμα 2-23 [122].



Σχήμα 2-23. Επίδραση διαφορετικών ρυθμών αύξησης της θερμοκρασίας στο αποτέλεσμα της δοκιμής [122].



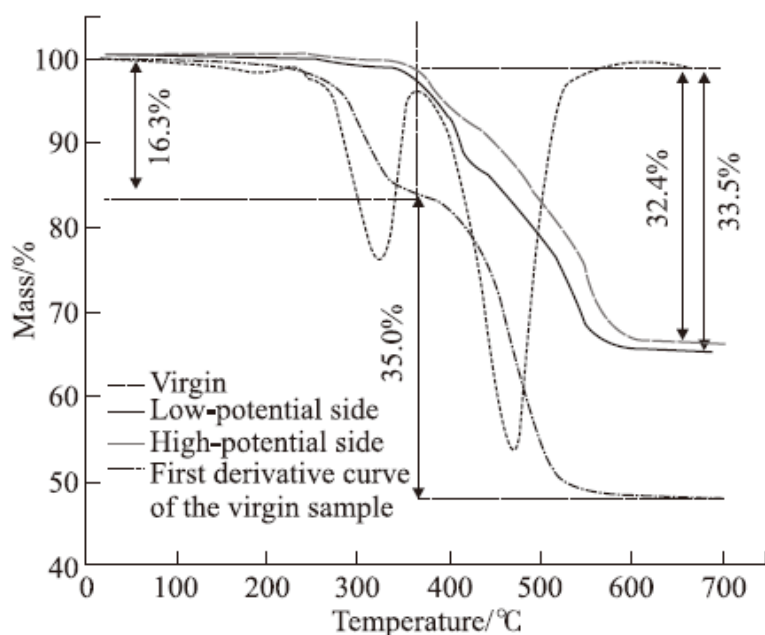
Σχήμα 2-24. Καμπύλη θερμοβαρυσμετρικής ανάλυσης για το aluminium trihydrate για δύο μεγέθη σωματιδίων [4].

Στο σχήμα 2-24 φαίνεται το αποτέλεσμα της θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης στο πληρωτικό υλικό που χρησιμοποιείται πλέον περισσότερο στους συνθετικούς μονωτήρες, το aluminium trihydrate (ATH).

Από το σχήμα 2-24 φαίνεται ότι, υπάρχει μία απώλεια βάρους 34,6% που είναι το νερό που υπάρχει στο aluminium trihydrate (ATH) και αυτό που απομένει είναι Al_2O_3 . Οπότε, το μόριο του aluminium trihydrate αποτελείται από περίπου 34,6% νερό. Αυτή η παρατήρηση χρησιμεύει στο να μπορεί κανείς να υπολογίσει τη συγκέντρωση του πληρωτικού υλικού aluminium trihydrate μέσα στο σιλικονούχο καουτσούκ, όταν έχει διαθέσιμη την καμπύλη της θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης [4].

Άλλος ένας λόγος που είναι πολύ σημαντική η θερμοβαρυμετρική ανάλυση είναι ότι δείχνει τη θερμική σταθερότητα του υλικού, κάτι το οποίο ενδιαφέρει ιδιαίτερος στην τεχνολογία των συνθετικών μονωτήρων. Συγκεκριμένα, σε κάθε έρευνα που γίνεται για νέο υλικό μονωτικού περιβλήματος ή για νέο πληρωτικό υλικό μέσα σε αυτό λαμβάνεται υπόψιν αυτή η μέτρηση [96, 103, 124].

Επιπλέον, αυτή η δοκιμή έχει χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της γήρανσης σε συνθετικούς μονωτήρες που ήταν σε λειτουργία σε σχέση με άλλους καινούριους. Υπάρχουν αναφορές ότι δεν υπήρχε κάποια ουσιαστική διαφορά στο αποτέλεσμα της μέτρησης [90, 100, 101], όπως και αναφορές ότι η γήρανση επηρεάζει τη μέτρηση. Πιο συγκεκριμένα έχει παρατηρηθεί ότι όταν αυξάνονται τα χρόνια λειτουργίας του συνθετικού μονωτήρα, ο ρυθμός απώλειας βάρους κατά τη θερμοβαρυμετρική ανάλυση μειώνεται [122], καθώς επίσης ότι τα γηρασμένα δοκίμια συνθετικών μονωτήρων έχουν μόνο το δεύτερο στάδιο αποσύνθεσης κατά τη δοκιμή αυτή (αυτό της αποσύνθεσης του PDMS), ενώ απουσιάζει το στάδιο της αποσύνθεσης του aluminium trihydrate (ATH). Μια εξήγηση που έδωσαν οι ερευνητές που το παρατήρησαν ήταν ότι τα σωματίδια του ATH που βρίσκονταν κοντά στην επιφάνεια του σιλικονούχου καουτσούκ (silicone rubber), έχουν αποσυντεθεί λόγω της έκθεσης σε συνθήκες και γήρανση εξωτερικού χώρου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-25. Επίσης από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι, τα δοκίμια που ελήφθησαν από την πλευρά κοντά στην υψηλή τάση έχουν μικρότερη μείωση στο βάρος, που σημαίνει ότι περιέχει περισσότερα ανόργανα συστατικά μέρη από ότι τα δοκίμια κοντά στην άλλη πλευρά του μονωτήρα. Αυτό πιθανόν συμβαίνει λόγω του φαινομένου Corona που υπάρχει πιο έντονα στην πλευρά της υψηλής τάσης [125].



Σχήμα 2-25. Καμπύλες θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης για καινούριο δείγμα, γηρασμένο κοντά στην πλευρά της υψηλής τάσης και γηρασμένο κοντά στην πλευρά της χαμηλής τάσης [125].

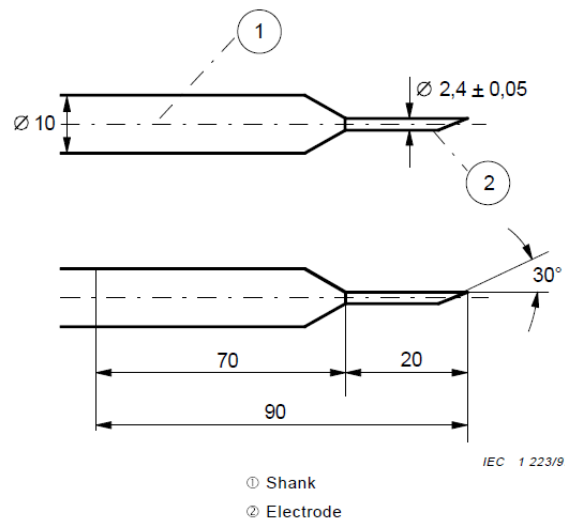
Τέλος αναφέρεται ότι αυτή η μέτρηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την αξιολόγηση της σύνθεσης του υλικού της ράβδου των συνθετικών μονωτήρων [119, 126], σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61006 [127].

2.2.1.9 Αντίσταση σε εκκενώσεις υπό υψηλή τάση και χαμηλό ρεύμα

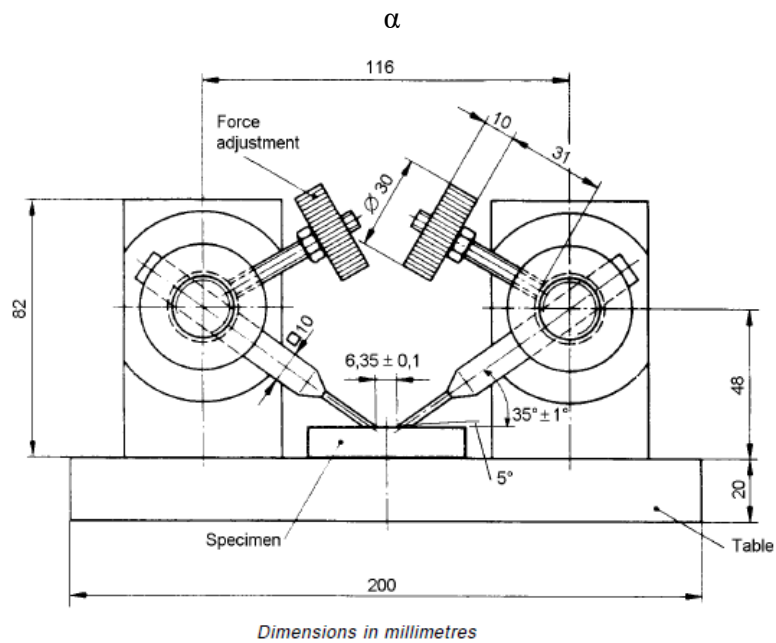
Η δοκιμή προσδιορισμού της αντοχής του υλικού του μονωτικού περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων σε εκκενώσεις υπό υψηλή τάση και χαμηλό ρεύμα είναι ακόμα μία σημαντική και χρήσιμη δοκιμή στη βιομηχανία των συνθετικών μονωτήρων. Συγκεκριμένα, η δοκιμή αυτή μπορεί να δώσει αποτελέσματα σχετικά με την αντοχή του υλικού στη δημιουργία αγωγίμων μονοπατιών και στη διάβρωση (tracking and erosion), όπως και η δοκιμή του κεκλιμένου επιπέδου που έχει αναλυθεί στο υποκεφάλαιο 2.2.1.4 [4, 128, 129, 130]. Το πλεονέκτημα αυτής της δοκιμής σε σχέση με τη δοκιμή του κεκλιμένου επιπέδου έγκειται στο ότι είναι πολύ πιο γρήγορη, καθώς απαιτεί το πολύ 7 λεπτά για τη διεξαγωγή της. Η δοκιμή αυτή ουσιαστικά προσομοιώνει τις εκκενώσεις ξηρής ζώνης (dry band discharges) που συμβαίνουν στους συνθετικούς μονωτήρες κατά τη λειτουργία τους στο ηλεκτρικό δίκτυο [130].

Για την εκτέλεση της δοκιμής αυτής ακολουθείται η διαδικασία του Προτύπου IEC 61621 [131]. Σύμφωνα με το Πρότυπο, οι διαστάσεις των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται

καθώς και οι διαστάσεις όλης της διάταξης με την οποία πρέπει να πραγματοποιηθεί η δοκιμή φαίνονται στο σχήμα 2-26.



① Shank
② Electrode
Dimensions in millimetres



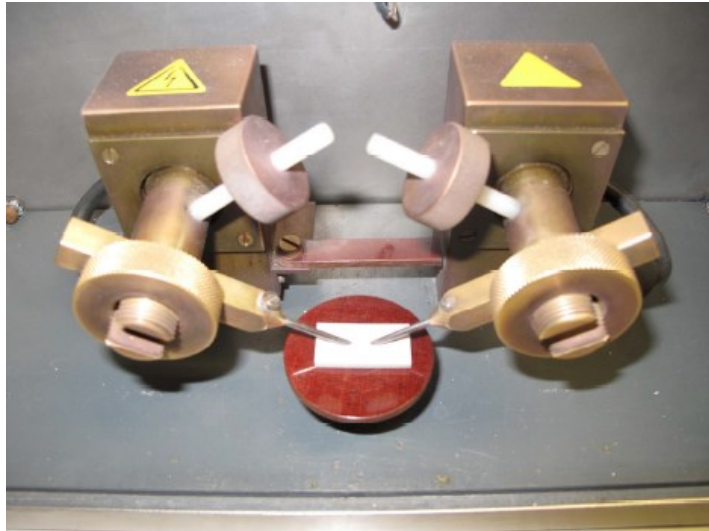
Dimensions in millimetres

β

Σχήμα 2-26. α) Διαστάσεις ηλεκτροδίων, β) συνολική διάταξη που χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή της δοκιμής [131].

Ένα παράδειγμα πραγματικής διάταξης της δοκιμής φαίνεται στο σχήμα 2-27.

Κατά τη δοκιμή αυτή τα δοκίμια καταπονούνται με ένα ρεύμα το οποίο δημιουργείται μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων της διάταξης και αυξάνεται σταδιακά ανά 1 λεπτό, όπως επίσης αυξάνεται και η διάρκεια που το ρεύμα αυτό καταπονεί το δοκίμιο σύμφωνα με τον πίνακα 2-3.



Σχήμα 2-27. Παράδειγμα διάταξης της δοκιμής προσδιορισμού της αντίστασης σε εκκενώσεις υπό υψηλή τάση και χαμηλό ρεύμα [130].

Πίνακας 2-3. Βήματα αύξησης του ρεύματος μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων της διάταξης [131].

Ρεύμα [mA]	Χρονικοί κύκλοι [s]	Συνολικός χρόνος [s]
10	1/8 on, 7/8 off	60
10	1/4 on, 3/4 off	120
10	1/2 on, 1/2 off	180
10	Συνεχόμενα	240
20	Συνεχόμενα	300
30	Συνεχόμενα	360
40	Συνεχόμενα	420

Στο σχήμα 2-28 φαίνεται ένα παράδειγμα εκτέλεσης της δοκιμής αυτής.

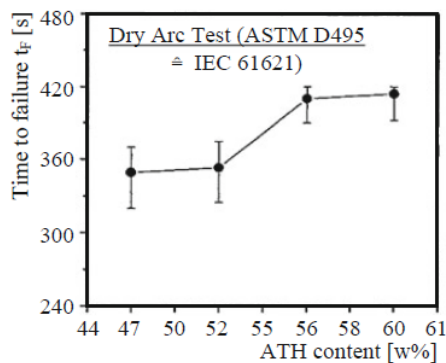


Σχήμα 2-28. Παράδειγμα εκτέλεσης της δοκιμής προσδιορισμού της αντίστασης σε εκκενώσεις υπό υψηλή τάση και χαμηλό ρεύμα, όπου φαίνεται το τόξο (ρεύμα) που δημιουργείται στην επιφάνεια του δοκιμίου[130].

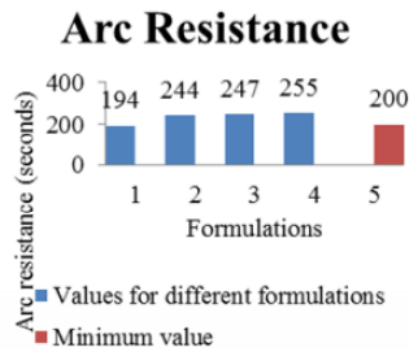
Πριν τη διεξαγωγή της δοκιμής η τάση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων σε ανοιχτό κύκλωμα θα πρέπει να είναι 12,5 kV. Επίσης, στη συγκεκριμένη δοκιμή ενδιαφέρει ιδιαίτερα στο θάλαμο διεξαγωγής της να μην υπάρχουν ρεύματα αέρα και γι' αυτό το λόγο θα πρέπει ο θάλαμος να μην έχει εξαερισμό και να έχει διαστάσεις όχι μικρότερες από 300 mm x 150 mm x 100 mm. Επιπλέον, για να είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα θα πρέπει η δοκιμή να επαναληφθεί τουλάχιστον 5 φορές για το κάθε εξεταζόμενο υλικό. Το πάχος των δοκιμίων θα πρέπει να είναι $3 \text{ mm} \pm 0,4 \text{ mm}$ και αν είναι διαφορετικό θα πρέπει να αναφέρεται, καθώς επίσης ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στην απόσταση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων της διάταξης, η οποία θα πρέπει να είναι $6,35 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$. Τα δοκίμια θα πρέπει να εκτίθενται σε θερμοκρασία $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ και σχετική υγρασία $50 \% \pm 5 \%$ για τουλάχιστον 24 ώρες πριν τη δοκιμή. Το αποτέλεσμα της δοκιμής αυτής είναι ο χρόνος (σε s) μέχρι τη στιγμή που συνέβη αστοχία στο δοκίμιο. Ως αστοχία ορίζεται η δημιουργία αγωγίμης διαδρομής στο υλικό υπό εξέταση. Αστοχία θεωρείται επίσης, εάν το τόξο προκαλέσει καύση του υλικού και η καύση αυτή συνεχίζεται, όταν διακόπτεται το τόξο (δηλαδή όταν χειροκίνητα απενεργοποιείται η συσκευή). Διαφορετικά, εάν δεν προκύψει αστοχία, η δοκιμή απενεργοποιείται αυτόματα μετά από 420 s [131, 132].

Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι για μονωτικά υλικά εξωτερικής χρήσης, ο ελάχιστος χρόνος αντοχής τους στη συγκεκριμένη δοκιμή θα πρέπει να είναι 180 s [4, 133] ή αλλού αναφέρεται ότι θα πρέπει να είναι 200 s [56].

Η συγκεκριμένη δοκιμή χρησιμοποιείται πολύ σε έρευνες που γίνονται σχετικά με τα πληρωτικά υλικά που προστίθενται στο σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber), ώστε να προσδώσουν σε αυτό καλύτερες ιδιότητες. Το αποτέλεσμα το οποίο προσπαθούν να επιτύχουν οι ερευνητές σε αυτήν τη δοκιμή με τα διάφορα πληρωτικά υλικά είναι να βρουν το υλικό με τη μεγαλύτερη αντοχή σε εκκενώσεις υπό υψηλή τάση και χαμηλό ρεύμα [134, 135, 136]. Συγκεκριμένα έχει γίνει έρευνα και για το πλέον διαδεδομένο πληρωτικό υλικό στη βιομηχανία των συνθετικών μονωτήρων, το aluminium trihydrate (ATH). Έχει παρατηρηθεί ότι, καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση του ATH μέσα στο σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber), αυξάνεται και η αντοχή του στη δοκιμή αυτή, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-29 [4, 56, 135]. Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί ότι όταν χρησιμοποιούνται μεγαλύτερα σωματίδια του πληρωτικού υλικού ATH μέσα στο silicone rubber, τότε το υλικό εμφανίζει μεγαλύτερη αντοχή στη δοκιμή αυτή [130].



α



β

Σχήμα 2-29. α) Αντοχή στη δοκιμή προσδιορισμού της αντίστασης σε εκκενώσεις υπό υψηλή τάση και χαμηλό ρεύμα καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση του υλικού aluminium trihydrate (ATH) στο σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) [4], β) ομοίως με το α (το 1 είναι καθαρό σιλικονούχο καουτσούκ και καθώς προχωράμε προς το 4 αυξάνεται η συγκέντρωση ATH στο silicone rubber [56].

Επίσης, αρκετοί ερευνητές έχουν προσπαθήσει να συσχετίσουν τη δοκιμή αυτή, η οποία πραγματοποιείται με εναλλασσόμενη τάση (AC), με την αντίστοιχη πραγματοποίηση της με συνεχή τάση (DC). Έχει διαπιστωθεί ότι η συγκεκριμένη δοκιμή είναι πολύ δυσμενέστερη αν γίνει με συνεχή τάση (DC). Συγκεκριμένα, η ηλεκτρική ισχύς του τόξου που δημιουργείται με DC τάση είναι 15 – 20 % υψηλότερη σε σχέση με την αντίστοιχη AC τάση, όπως επίσης τα ίδια ποσοστά ισχύουν και για την αναπτυσσόμενη θερμοκρασία στην επιφάνεια του εξεταζόμενου δοκιμίου [137, 138]. Ίδια επίπεδα θερμοκρασίας εμφανίζονται κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής με DC τάση σε σχέση με τη διεξαγωγή με AC τάση, όταν στην περίπτωση της DC τάσης το ρεύμα έχει μικρότερη τιμή από την περίπτωση της AC τάσης. Ακόμη διαπιστώθηκε ότι, όταν η δοκιμή πραγματοποιείται με DC τάση, η θερμοκρασία κατανέμεται ανομοιόμορφα επάνω στο δοκίμιο σε αντίθεση με την ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας κατά την εκτέλεση της δοκιμής με AC τάση [138]. Σχετικά με την αναπτυσσόμενη θερμοκρασία επάνω στο δοκίμιο κατά τη δοκιμή αυτή, οι συγγραφείς του [139] ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο που εκτιμά τη θερμοκρασία στην επιφάνεια του δοκιμίου γνωρίζοντας τη θερμοκρασία που μετρείται σε κάποιο βάθος μέσα στο υλικό κατά την έκθεση στο τόξο (ρεύμα).

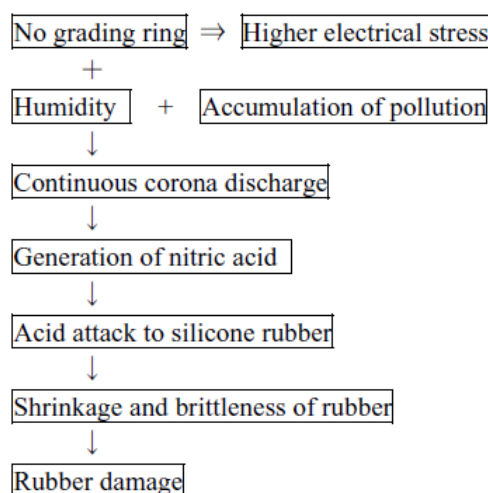
Τέλος, αναφέρεται ότι η συγκεκριμένη δοκιμή έχει εφαρμοστεί και για τον προσδιορισμό της αντοχής του υλικού της ράβδου των συνθετικών μονωτήρων σε εκκενώσεις υπό υψηλή τάση και χαμηλό ρεύμα [140].

2.2.1.10 Αντίσταση του μονωτικού περιβλήματος σε οξεία

Άλλη μία σημαντική παράμετρος η οποία πρέπει να διευκρινίζεται για το μονωτικό περίβλημα των συνθετικών μονωτήρων είναι η αντοχή του σε διάφορα οξεία, τα οποία

δημιουργούνται στην επιφάνεια του κατά τη διάρκεια της λειτουργίας των συνθετικών μονωτήρων στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η σημασία της δοκιμής προσδιορισμού της αντίστασης του υλικού σε διάβρωση λόγω οξέων έγκειται στο γεγονός ότι η δοκιμή αυτή προσομοιώνει την κατάσταση και τις συνθήκες λειτουργίας των συνθετικών μονωτήρων στο ηλεκτρικό δίκτυο σχετικά με τη διάβρωση που μπορεί να υποστούν λόγω οξέων [4]. Πρόκειται για οξέα τα οποία δημιουργούνται λόγω:

- των ηλεκτρικών εκκενώσεων Corona, που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία των συνθετικών μονωτήρων στο ηλεκτρικό δίκτυο, σε συνδυασμό με την παρουσία νερού (όπως υγρασία, πάχνη, ομίχλη κ.λπ.) και οξυγόνου. Το οξύ που δημιουργείται λόγω του φαινομένου corona είναι το νιτρικό οξύ (nitric acid – HNO_3) [4, 87, 141, 142, 143, 144, 145, 146]. Στο σχήμα 2-30 φαίνεται ο μηχανισμός με τον οποίο δρα το φαινόμενο corona στο σχηματισμό του νιτρικού οξέος και κατά συνέπεια στη διάβρωση του σιλικονούχου καουτσούκ (silicone rubber) [141].



Σχήμα 2-30. Μηχανισμός δημιουργίας νιτρικού οξέος λόγω του φαινομένου corona και επιρροή στο σιλικονούχο καουτσούκ [141].

- της βροχής σε βιομηχανικές και αστικές περιοχές, η οποία κατερχόμενη από τα σύννεφα συναντά οξειδία του θείου (SO_x), οξειδία του αζώτου (NO_x) και άλλους ρύπους τα οποία διαλυόμενα στη βροχή μετατρέπονται σε θειϊκό οξύ (sulfuric acid – H_2SO_4), νιτρικό οξύ (HNO_3) και άλλους τύπους οξέων (όξινη βροχή) [147, 148, 149].

Έχει διαπιστωθεί ότι τα οξέα αυτά, όταν έρθουν σε επαφή με το μονωτικό περίβλημα των συνθετικών μονωτήρων προκαλούν την χημική εξουδετέρωση κάποιων πρόσθετων που χρησιμοποιούνται μέσα στο σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber), όπως το aluminium trihydrate (ATH) [4, 148, 150] και το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) [4, 87], καθώς επίσης

χάνονται και κάποια σωματίδια χαμηλού μοριακού βάρους του υλικού (low molecular weight (LMW) particles) [150]. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, μειώνεται η υδροφοβικότητα του σιλικονούχου καουτσούκ (silicone rubber) [148, 150], αρχίζουν να δημιουργούνται αγωγή μονοπάτια άνθρακα και διάβρωση (tracking and erosion), αυξάνονται οι μερικές εκκενώσεις και αυξάνεται το ρεύμα διαρροής στους συνθετικούς μονωτήρες [148].

Ως λύσεις, ώστε να αυξηθεί η αντοχή του σιλικονούχου καουτσούκ (silicone rubber) στη διάβρωση που του προκαλούν τα οξέα (κυρίως νιτρικό οξύ) έχουν προταθεί οι παρακάτω:

- Να γίνεται σιλανικοποίηση (silanization) του πληρωτικού υλικού aluminium trihydrate (ATH), ώστε να περιοριστεί η διαδικασία της χημικής εξουδετέρωσης που λαμβάνει χώρα όταν αυτό το υλικό έρχεται σε επαφή με τα οξέα [4].
- Να περιορίζεται όσο το δυνατόν περισσότερο το φαινόμενο corona που συμβαίνει στους συνθετικούς μονωτήρες που βρίσκονται σε λειτουργία στο ηλεκτρικό δίκτυο, για παράδειγμα με την τοποθέτηση δακτυλίων περιορισμού του φαινομένου corona (corona rings) στους μονωτήρες [141].

Για τη δοκιμή αυτή δεν υπάρχει κάποιο Πρότυπο το οποίο να καθορίζει τη διαδικασία με την οποία θα εκτελείται και τις παραμέτρους που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διεξαγωγή της, όμως η ομάδα εργασίας D1.27 της Cigre δουλεύει πάνω σε αυτό το θέμα [4].

Έτσι, λόγω της έλλειψης προτύπου, έχουν αναφερθεί και χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία διάφορες διερευνητικές διαδικασίες εκτέλεσης της δοκιμής αυτής και των παραμέτρων που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Κάποιες από αυτές αναφέρονται παρακάτω:

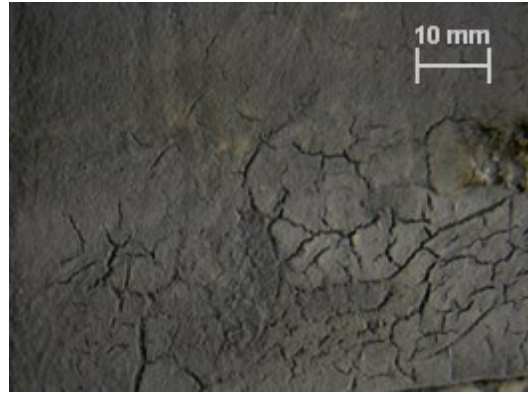
- Παρασκευή διαλύματος 1 mol νιτρικού οξέος / λίτρο απιονισμένου νερού, το οποίο αντιστοιχεί σε μία τιμή $\text{pH} \approx 0$. Τοποθέτηση του δοκιμίου μέσα στο διάλυμα για 7 μέρες. Οπτική παρατήρηση και ζύγιση του δοκιμίου πριν και μετά τη δοκιμή για συγκρίσεις. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι υπάρχει απώλεια βάρους μετά τη δοκιμή καθώς γίνεται χημική εξουδετέρωση του πληρωτικού υλικού (συνήθως aluminium trihydrate) με το νιτρικό οξύ [4].
- Παρασκευή διαλύματος 1 mol νιτρικού οξέος / λίτρο απιονισμένου νερού, το οποίο αντιστοιχεί σε μία τιμή $\text{pH} \approx 0$. Τοποθέτηση του δοκιμίου μέσα στο διάλυμα για 5 μήνες.

Το αποτέλεσμα φαίνεται στο σχήμα 2-31. Παρά την πολύ μεγάλη καταπόνηση του δοκιμίου κατά τη δοκιμή αυτή, σε σχέση με τις πραγματικές συνθήκες, παρατηρήθηκε ότι οι ρωγμές που δημιουργήθηκαν δεν είχαν ξεπεράσει το σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) και κατά συνέπεια το οξύ δεν έφτασε ποτέ στη ράβδο του συνθετικού μονωτήρα [4].



Σχήμα 2-31. Κομμάτι της ράβδου συνθετικού μονωτήρα καλυμμένο με μονωτικό περίβλημα από high temperature vulcanized (HTV) σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) μετά από έκθεση του σε διάλυμα νιτρικού οξέος για 5 μήνες [4].

- Παρασκευή διαλύματος 1 mol νιτρικού οξέος / λίτρο απιονισμένου νερού. Τοποθέτηση του δοκιμίου μέσα στο διάλυμα για 7 μέρες και διατήρηση της θερμοκρασίας του διαλύματος στους 30 °C [141].
- Παρασκευή διαλύματος νιτρικού οξέος με pH = 3,9. Τοποθέτηση του δοκιμίου μέσα στο διάλυμα για 1 μήνα και διατήρηση της θερμοκρασίας του διαλύματος στους 90 °C. Ζύγιση του δοκιμίου πριν και μετά τη δοκιμή για συγκρίσεις. Η δοκιμή αυτή αναφέρεται ότι ισοδυναμεί με 90 μήνες λειτουργίας του συνθετικού μονωτήρα στο ηλεκτρικό δίκτυο [147].
- Παρασκευή διαλύματος νιτρικού οξέος με pH = 4 ± 0,4 (το οποίο ελεγχόταν κάθε 5 ώρες). Τοποθέτηση του δοκιμίου μέσα στο διάλυμα για 2 εβδομάδες και διατήρηση της θερμοκρασίας του διαλύματος στους 80 °C μέσα σε φούρνο. Οπτική επιθεώρηση του δοκιμίου πριν και μετά τη δοκιμή, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-32, για συγκρίσεις [147].
- Παρασκευή διαλύματος αραιωμένου νιτρικού και θεικού οξέος. Τοποθέτηση του δοκιμίου μέσα στο διάλυμα για 5 εβδομάδες και διατήρηση της θερμοκρασίας του διαλύματος σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οπτική παρατήρηση του δοκιμίου πριν και μετά τη δοκιμή για συγκρίσεις [114].
- Παρασκευή διαλύματος απιονισμένου νερού – χλωριούχου νατρίου (NaCl) σε συγκεντρώσεις 0,1 mol/λίτρο, 0,5 mol/λίτρο και 1 mol/λίτρο – και νιτρικού οξέος σε συγκεντρώσεις 0,001 mol/λίτρο, 0,01 mol/λίτρο και 0,1 mol/λίτρο και διατήρηση της θερμοκρασίας του διαλύματος στους 30 ± 1 °C. Έπειτα στέγνωμα του δοκιμίου σε αφυγραντήρα με διατήρηση της σχετικής υγρασίας σε ποσοστό 30 ± 10% [150].



Σχήμα 2-32. Διάβρωση της επιφάνειας υλικού room temperature vulcanized (RTV) σιλικονούχου καουτσούκ (silicone rubber) από συνθετικό μονωτήρα μετά από 2 εβδομάδες έκθεσης του σε νιτρικό οξύ με $\text{pH} = 4 \pm 0,4$ [147].

2.2.2 Δοκιμές στη ράβδο

Εκτός από τις δοκιμές οι οποίες δίνουν συμπεράσματα για την ποιότητα του μονωτικού περιβλήματος, υπάρχουν και δοκιμές οι οποίες αποσκοπούν στην αξιολόγηση του υλικού της ράβδου των συνθετικών μονωτήρων. Παρακάτω γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση για δύο από αυτές τις δοκιμές.

2.2.2.1 Δοκιμή διάχυσης νερού (*Water diffusion test*)

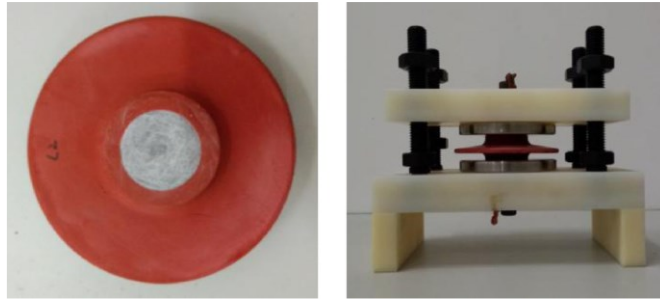
Μία συνηθισμένη και πολύ χρήσιμη δοκιμή για τον έλεγχο της ποιότητας του υλικού της ράβδου των συνθετικών μονωτήρων είναι η δοκιμή διάχυσης νερού (water diffusion test). Πρόκειται για μια καταστροφική δοκιμή, η οποία γίνεται κατά τη φάση του σχεδιασμού (design test) των συνθετικών μονωτήρων στο εργοστάσιο παραγωγής τους [151].

Για τη διεξαγωγή της δοκιμής αυτής ακολουθείται η διαδικασία που αναγράφεται στο Πρότυπο IEC 62217 [151]. Για τη δοκιμή αυτή απαιτούνται 6 δοκίμια από κάθε συνθετικό μονωτήρα που θα ελεγχθεί. Τα δοκίμια είναι κομμένα κομμάτια από τη ράβδο του συνθετικού μονωτήρα, μήκους $30 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$. Για το κόψιμο των δοκιμίων χρησιμοποιείται πριόνι με κυκλική λεπίδα κοπής επιστρωμένη με διαμάντια την οποία καταβρέχει τρεχούμενο νερό. Προσοχή κατά το κόψιμο των δοκιμίων θα πρέπει να δίνεται στην κλίση κοπής, η οποία θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στις 90° ως προς τον άξονα του συνθετικού μονωτήρα, ώστε τα δοκίμια να είναι επίπεδα και από τις δύο πλευρές. Αφού κοπούν τα δοκίμια, λειαίνονται με τη βοήθεια γυαλόχαρτου (νούμερο 180) και στη συνέχεια καθαρίζονται με ισοπροπυλική αλκοόλη και χαρτί. Στη συνέχεια τα δοκίμια τοποθετούνται για βρασμό σε κατάλληλο δοχείο (από γυαλί ή από ανοξείδωτο

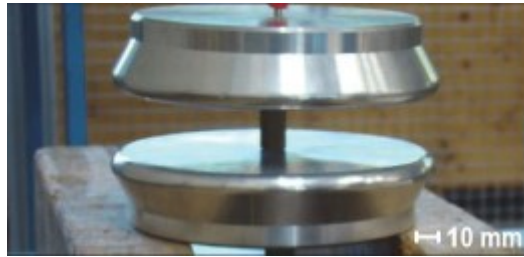
ατσάλι) για $100 \pm 0,5$ ώρες μέσα σε διάλυμα απιονισμένου νερού με 0,1% κατά βάρος χλωριούχο νάτριο (NaCl). Μετά το βρασμό τα δοκίμια αφαιρούνται από το δοχείο βρασμού και τοποθετούνται σε δοχείο με νερό βρύσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για τουλάχιστον 15 λεπτά, ώστε να κρυώσουν. Η δοκιμή θα πρέπει να πραγματοποιηθεί μέσα σε 3 ώρες από τη στιγμή που τελείωσε το στάδιο βρασμού των δοκιμίων. Τα δοκίμια τοποθετούνται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων σε σχήμα πλάκας και τους εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση (AC) 12 kV (r.m.s.) για ένα λεπτό (σχήμα 2-33), ενώ μετράται και το ρεύμα στο κύκλωμα αυτό (σχήμα 2-34). Για να είναι επιτυχής η δοκιμή, το ρεύμα δε θα πρέπει να ξεπεράσει την τιμή του 1 mA (r.m.s.) [151].

Ένας από τους λόγους που χρησιμοποιείται αυτή η δοκιμή στη βιομηχανία των συνθετικών μονωτήρων είναι ότι μπορεί να δώσει συμπεράσματα για την ποιότητα του υλικού της ράβδου σε περίπτωση τροποποίησης του υλικού της [140]. Αναφέρεται στη βιβλιογραφία ότι έχει γίνει διερεύνηση του υλικού της ράβδου με τη δοκιμή αυτή μετά από προσθήκη προσθετικών υλικών, όπως τα nano silica, nano alumina, micro ATH, micro CaCO₃ και micro MgO και παρατηρήθηκε ότι το μετρούμενο ρεύμα διαρροής κατά τη δοκιμή μειώνεται σημαντικά [153, 154]. Σε άλλη έρευνα, σχετική με την κατασκευαστική διαδικασία της ράβδου των συνθετικών μονωτήρων γνωστή ως «pultrusion method», παρατηρήθηκε ότι αν οι ίνες γυαλιού, που τοποθετούνται μέσα στη ράβδο, δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένες, τότε το αποτέλεσμα της δοκιμής αυτής δεν επηρεάζεται αν τα κενά μεταξύ των γυάλινων ινών έχουν καλυφθεί πλήρως με ρητίνη, ενώ επηρεάζεται αν τα κενά παραμείνουν [155]. Άλλοι ερευνητές, ζυγίζοντας τη μάζα των δοκιμίων και διεξάγοντας τη δοκιμή πριν το βρασμό και μετά το βρασμό, παρατήρησαν ότι δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της αύξησης της μάζας των δοκιμίων μετά το βρασμό και του ρεύματος διαρροής κατά τη δοκιμή [156].

Η δοκιμή διάχυσης νερού χρησιμοποιείται επίσης σε περιπτώσεις μεταχειρισμένων μονωτήρων που αφαιρέθηκαν από το ηλεκτρικό δίκτυο λόγω κάποιας αστοχίας και απαιτείται η διερεύνηση της αιτίας της αστοχίας αυτής [36, 143, 152, 157]. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2-35 από μια τέτοια διερεύνηση προέκυψε ότι τα δοκίμια που λήφθηκαν από την πλευρά της υψηλής τάσης των συνθετικών μονωτήρων είχαν μεγαλύτερα ρεύματα διαρροής κατά τη δοκιμή αυτή από τα δοκίμια που λήφθηκαν από το μέσον και από την πλευρά της γείωσης των μονωτήρων [152].

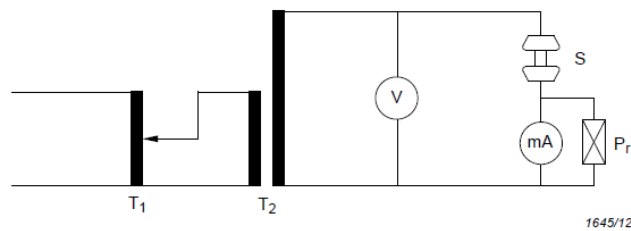


α



β

Σχήμα 2-33. Παραδείγματα τοποθέτησης δοκιμίων μεταξύ των ηλεκτροδίων σχήματος πλάκας κατά τη δοκιμή διάχυσης νερού α) [152], β) [140].



1645/12

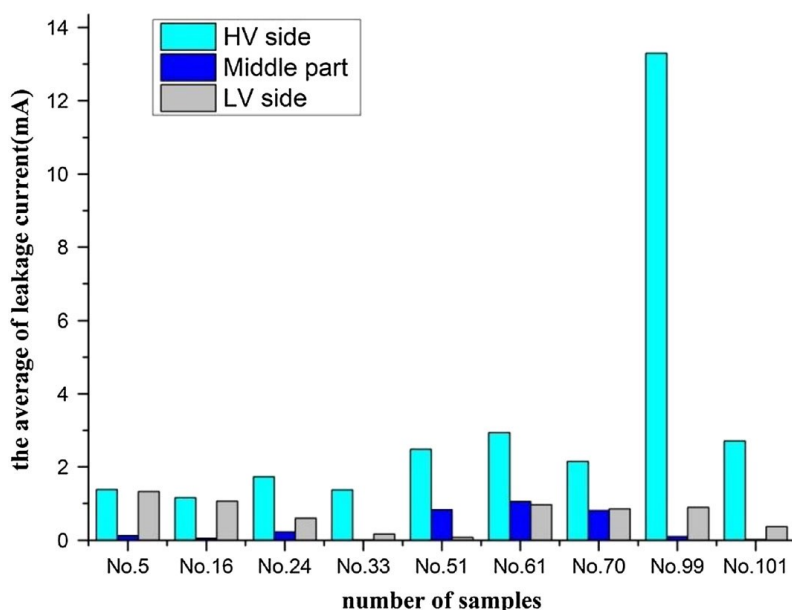
Key

- T₁ regulator
- T₂ high-voltage test transformer
- V high-voltage measurement
- mA milliamperemeter
- P_r protection for the milliamperemeter
- S electrodes with test-specimen

Σχήμα 2-34. Ηλεκτρικό κύκλωμα που χρησιμοποιείται για τη δοκιμή διάχυσης νερού [151].

Στην τεχνολογία των συνθετικών μονωτήρων είναι πολύ σημαντικό να υπάρχει καλή ένωση στη διεπαφή (interface) μεταξύ του μονωτικού περιβλήματος (σιλικονούχου καουτσούκ) και της ράβδου, καθώς έχει διαπιστωθεί ότι πολλές από τις αστοχίες που συμβαίνουν στους συνθετικούς μονωτήρες έχουν ως κύρια αιτία την ύπαρξη κακής ή καθόλου ένωσης μεταξύ των δύο αυτών υλικών [158]. Έχει παρατηρηθεί μετά από έρευνες ότι η δοκιμή διάχυσης νερού μπορεί να δώσει μια εικόνα της κατάστασης της σύνδεσης αυτών των δύο υλικών μετρώντας το ρεύμα διαρροής. Συγκεκριμένα αναφέρεται ότι σε περιπτώσεις κακής ή καθόλου σύνδεσης του μονωτικού περιβλήματος με τη ράβδο

παρατηρούνται μεγάλα ρεύματα διαρροής κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής [157, 158, 159, 160].

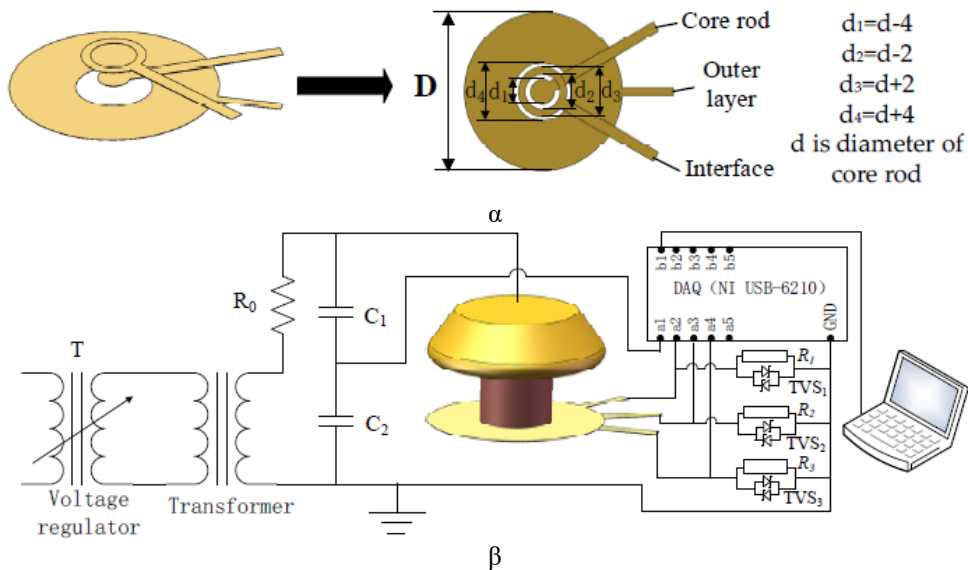


Σχήμα 2-35. Μέση τιμή ρευμάτων διαρροής κατά τη δοκιμή διάχυσης νερού δοκιμίων από την πλευρά της υψηλής τάσης (HV side), του μέσου (Middle part) και της γείωσης (LV side) μεταχειρισμένων μονωτήρων [152].

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται επίσης κάποιες τροποποιήσεις στη διαδικασία της δοκιμής που εφάρμοσαν ερευνητές και διαπίστωσαν ότι δίνουν καλύτερα αποτελέσματα. Ορισμένες από αυτές τις τροποποιήσεις αναφέρονται παρακάτω:

- Αναπτύχθηκε μια συσκευή με αισθητήρες μέτρησης του ρεύματος διαρροής σε διάφορα σημεία του δοκιμίου και διαπιστώθηκε ότι όταν κατά τη δοκιμή υπάρχει μεγάλο ρεύμα διαρροής, μπορεί να προσδιοριστεί αν αυτό προέρχεται: μέσα από τη ράβδο, από τη διεπαφή ράβδου-μονωτικού περιβλήματος ή από το μονωτικό περίβλημα. Στο σχήμα 2-36 φαίνεται η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και η τροποποίηση στο κάτω ηλεκτρόδιο της διάταξης [161].
- Προτάθηκε από κάποιους ερευνητές ο βρασμός των δοκιμίων της δοκιμής αυτής να γίνεται για 200 [160] και από άλλους για 300 [158] αντί για 100 ώρες (όπως ορίζει το Πρότυπο IEC 62217 [151]), ώστε να προκύπτουν από τη δοκιμή καλύτερα αποτελέσματα σχετικά με την ποιότητα της ένωσης μεταξύ ράβδου και μονωτικού περιβλήματος.
- Τέλος, αναφέρεται σε άλλη πηγή ότι, έπειτα από τη διαδικασία του Προτύπου IEC 62217 [151] κατά την οποία εφαρμόζεται τάση 12 kV (AC) στο δοκίμιο για ένα λεπτό,

θα πρέπει να εφαρμόζεται τάση 18 kV (AC) και στη συνέχεια να μηδενίζεται, ώστε να είναι καλύτερη η αξιολόγηση μεταξύ των υλικών [140].



Σχήμα 2-36. α) Τροποποίηση στο κάτω ηλεκτρόδιο της διάταξης ώστε να μετράει το ρεύμα διαρροής στη ράβδο, στη διεπαφή ράβδου-μονωτικού περιβλήματος και στο μονωτικό περίβλημα, β) τροποποίηση στο ηλεκτρικό κύκλωμα της διάταξης [161].

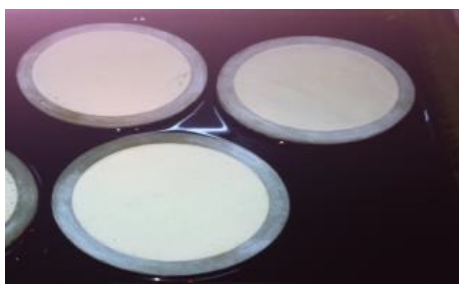
2.2.2.2 Δοκιμή διείσδυσης βαφής (Dye penetration test)

Η δοκιμή διείσδυσης βαφής (dye penetration test) είναι μία ακόμα δοκιμή που γίνεται με σκοπό τη διερεύνηση της κατάστασης και της ποιότητας του υλικού της ράβδου των συνθετικών μονωτήρων. Πρόκειται για καταστροφική δοκιμή, η οποία εφαρμόζεται κατά το σχεδιασμό (design test) των συνθετικών μονωτήρων εξωτερικού και εσωτερικού χώρου [4, 151, 162]. Με τη δοκιμή αυτή είναι δυνατόν να αποκαλυφθούν ατέλειες της ράβδου των συνθετικών μονωτήρων, όπως μικρές ρωγμές, μικρές τρύπες και κατασκευαστικές ατέλειες, όπως επίσης να διαπιστωθεί και το πόσο πορώδες είναι το υλικό της ράβδου (πορώδες υλικό μπορεί να οδηγήσει σε διάτρηση της ράβδου μετά από μακροχρόνια χρήση) μέσω του τριχοειδούς φαινομένου (capillary effect), κατά το οποίο μια διεισδυτική βαφή διαπερνά τη ράβδο και είναι δυνατή η οπτική παρατήρηση του σημείου όπου τη διαπέρασε [4, 163].

Η δοκιμή διείσδυσης βαφής πραγματοποιείται σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 62217 [151]. Όπως ορίζεται από το Πρότυπο, χρειάζονται 10 δοκίμια τα οποία κόβονται από το μονωτήρα που θέλουμε να εξετάσουμε με τη βοήθεια πριονιού με κυκλική λεπίδα κοπής επιστρωμένη με διαμάντια την οποία την καταβρέχει τρεχούμενο νερό, δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στη γωνία κοπής των δοκιμίων που θα πρέπει να είναι κάθετη στον άξονα του μονωτήρα, έτσι ώστε τα δοκίμια που θα προκύψουν να είναι όσο το δυνατόν πιο επίπεδα.

Το μήκος των δοκιμίων θα πρέπει να είναι $10\text{ mm} \pm 0,5\text{ mm}$. Μετά το κόψιμο, τα δοκίμια πρέπει να λειανθούν με γυαλόχαρτο μεγέθους 180. Στη συνέχεια, τοποθετούνται σε ένα δοχείο στον πάτο του οποίου υπάρχει ένα στρώμα ατσάλινων ή γυάλινων σφαιριδίων διαμέτρου 1 mm ή 2 mm. Παρασκευάζεται υγρό διάλυμα που περιέχει 1% κατά βάρος Astrazon BR 200 και το υπόλοιπο μεθανόλη (methanol), το οποίο τοποθετείται μέσα στο δοχείο που αναφέρθηκε προηγουμένως, με το επίπεδο του να φτάνει 2 με 3 mm πιο πάνω από το επίπεδο των σφαιριδίων. Τέλος, τα δοκίμια τοποθετούνται μέσα στο δοχείο. Κριτήριο για να είναι επιτυχής η συγκεκριμένη δοκιμή είναι να μην υπάρξει διείσδυση της βαφής στην επιφάνεια των δοκιμίων μέσα σε χρονικό διάστημα 15 λεπτών [151].

Στο σχήμα 2-37 (α) φαίνονται δοκίμια τα οποία ολοκλήρωσαν τα 15 λεπτά της δοκιμής χωρίς σημάδια διείσδυσης της βαφής, ενώ στο (β) φαίνονται δοκίμια τα οποία απέτυχαν στη δοκιμή μέσα στα 3 πρώτα λεπτά.



α



β

Σχήμα 2-37. α) Δοκίμια που περνάνε επιτυχώς τη δοκιμή διείσδυσης βαφής [164], β) δοκίμια που αποτυγχάνουν κατά τη δοκιμή αυτή μέσα στα 3 πρώτα λεπτά [157].

Σχετικά με το διεισδυτικό υγρό που χρησιμοποιείται κατά τη δοκιμή έχει γίνει εκτενής έρευνα σε διαφορετικά διεισδυτικά υγρά. Συγκεκριμένα έχουν διερευνηθεί η τοξικότητα των υγρών αυτών για την υγεία του ανθρώπου, ο χρόνος στον οποίο το κάθε υγρό διεισδύει σε όμοια δοκίμια, για να προσδιοριστεί το πόσο διεισδυτικό είναι το καθένα από αυτά και η καταλληλότητα του κάθε υγρού για τους σκοπούς της συγκεκριμένης δοκιμής. Για παράδειγμα, πριν την αναθεώρηση του Προτύπου IEC 62217 στην σημερινή του μορφή το 2012 [151], το διεισδυτικό υγρό που χρησιμοποιούνταν για τη δοκιμή αυτή ήταν το Fuchsiene, σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61109 του 1992 [165], το οποίο αποδείχτηκε ότι ήταν καρκινογόνο [166] και λιγότερο ισχυρό (ως προς τη διεισδυτικότητα) από το Astrazon BR 200 [4]. Επομένως, το αποτέλεσμα της δοκιμής αυτής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το διεισδυτικό υγρό που χρησιμοποιείται [166], αλλά και από τη συγκέντρωση του μέσα στο διάλυμα που χρησιμοποιείται [167].

Ένας ακόμα παράγοντας που επηρεάζει το αποτέλεσμα της δοκιμής αυτής είναι η χρονική διάρκεια η οποία καθορίζει την επιτυχία της δοκιμής, που τώρα είναι 15 λεπτά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω [151]. Προτείνεται από διάφορους ερευνητές η αύξηση του χρόνου αυτού, ώστε η δοκιμή να καταλήγει σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα [157, 160, 167].

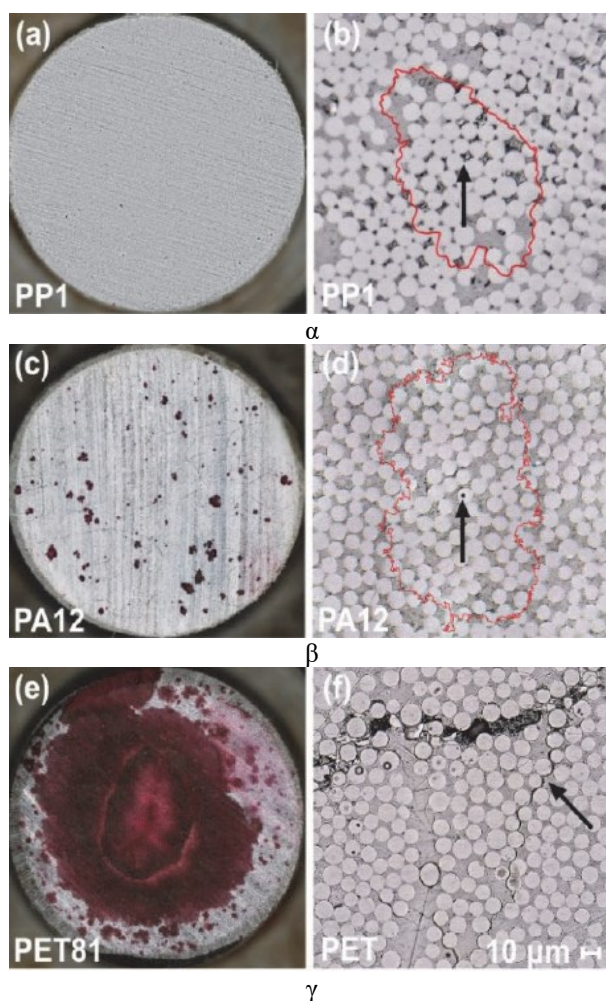
Η δοκιμή διείσδυσης βαφής στους συνθετικούς μονωτήρες είναι σημαντική και εξυπηρετεί τους παρακάτω σκοπούς:

- Αρχικά, χρησιμοποιείται από τους αγοραστές ή από ερευνητές για τη διερεύνηση του υλικού των ράβδων καινούριων μονωτήρων, ώστε να εξασφαλιστεί ότι πληρούν τις απαιτούμενες προδιαγραφές, είτε των διεθνών προτύπων, είτε του αγοραστή [143, 160, 167]. Επίσης, χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση καινούριων υλικών ή τροποποιήσεων στο υλικό της ράβδου από τους κατασκευαστές των συνθετικών μονωτήρων [153, 162, 164].
- Τα αποτελέσματα αυτής της δοκιμής είναι εξίσου σημαντικά όταν αυτή εφαρμόζεται σε μεταχειρισμένους – γηρασμένους μονωτήρες για να προκύψουν συμπεράσματα σχετικά με το πως επιδρά η γήρανση στο υλικό της ράβδου [36, 143, 168], αλλά και σε μονωτήρες οι οποίοι έχουν αποξηλωθεί από το δίκτυο έπειτα από κάποια αστοχία (σφάλμα) και απαιτείται η διερεύνηση των αιτιών της αστοχίας αυτής [143, 157, 169, 170].
- Επιπλέον, υπάρχουν αναφορές που λένε ότι το αποτέλεσμα της δοκιμής αυτής δίνει μια εικόνα για το αν είναι καλή η σύνδεση μεταξύ της ράβδου και του μονωτικού περιβλήματος [169, 170].

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2-38 (γ), έχει παρατηρηθεί ότι όταν συμβαίνει αποτυχία ενός δοκιμίου ράβδου στη συγκεκριμένη δοκιμή, η διεισδυτική βαφή ανεβαίνει κατακόρυφα από την κάτω πλευρά του δοκιμίου προς τα πάνω. Όμως στη συνέχεια, λόγω της επίδρασης της επιφανειακής τάσης (surface tension), αλλά και του φαινομένου Capillary η διεισδυτική βαφή που έχει βγει στην επιφάνεια του δοκιμίου έχει την τάση να εξαπλώνεται πάνω στην επιφάνεια κάνοντας έτσι δύσκολη την εύρεση των ακριβών σημείων στα οποία έγινε η απορρόφηση της βαφής, αλλά και του μεγέθους των σημείων αυτών. Στην αριστερή πλευρά του σχήματος 2-38 (γ) φαίνεται ένα κομμάτι ράβδου συνθετικού μονωτήρα μετά το πέρας της δοκιμής, καθώς και το χρώμα που έχει διεισδύσει στην επιφάνεια του και στη δεξιά πλευρά είναι η ίδια ράβδος μετά από εφαρμογή γυαλίσματος (polishing) σε αυτήν, ώστε να διαφανούν τα σημεία στα οποία διείσδυσε η βαφή [140].

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται 3 τύποι αποτυχίας των ράβδων των συνθετικών μονωτήρων κατά τη δοκιμή διείσδυσης βαφής:

1. Το διεισδυτικό υγρό περνάει μέσα από την εποξική ρητίνη (μήτρα), η οποία βρίσκεται στο χώρο ανάμεσα στις γυάλινες ίνες, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-38 α.
2. Το διεισδυτικό υγρό περνάει μέσα από τις γυάλινες ίνες λόγω κατασκευαστικής ατέλειας των ινών, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-38 β.
3. Το διεισδυτικό υγρό περνάει μέσα από κενά και ρωγμές μεταξύ των γυάλινων ινών και της εποξικής ρητίνης (μήτρας), όπως φαίνεται στο σχήμα 2-38 γ [140].



Σχήμα 2-38. α) Το διεισδυτικό υγρό περνάει μέσα από την εποξική ρητίνη (μήτρα), β) το διεισδυτικό υγρό περνάει μέσα από τις γυάλινες ίνες, γ) το διεισδυτικό υγρό περνάει μέσα από κενά και ρωγμές μεταξύ των γυάλινων ινών και της εποξικής ρητίνης (μήτρας). Η βαμμένη περιοχή από το διεισδυτικό υγρό στις φωτογραφίες της αριστερής πλευράς επισημαίνεται με κόκκινο περίγραμμα στις φωτογραφίες της δεξιάς πλευράς [140].

2.2.3 Δοκιμή ελέγχου της διεπαφής μεταξύ ράβδου και μονωτικού περιβλήματος

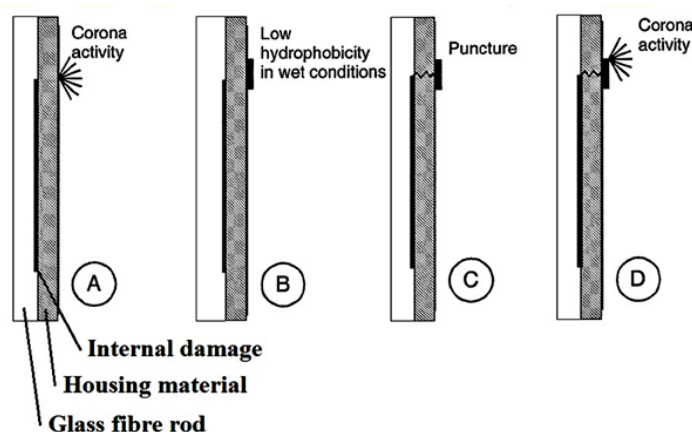
Εκτός από τις δοκιμές που αναλύθηκαν ήδη, οι οποίες πραγματοποιούνται με σκοπό τον έλεγχο της ποιότητας, αλλά και της κατάστασης μεμονωμένων υλικών (ξεχωριστά του κάθε υλικού) των συνθετικών μονωτήρων, όπως είναι το μονωτικό περίβλημα από σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) και η ράβδος από πλαστικό ενισχυμένο με υαλονήματα (glass fiber reinforced plastic), υπάρχουν και δοκιμές οι οποίες θα πρέπει να ελέγχουν τη σύνδεση των διαφορετικών υλικών του συνθετικού μονωτήρα. Μια τέτοια δοκιμή είναι αυτή που ελέγχει τη σύνδεση της ράβδου με το μονωτικό περίβλημα. Σκοπός δηλαδή αυτής της δοκιμής είναι να διαπιστωθεί αν υπάρχει σύνδεση μεταξύ της ράβδου και του μονωτικού περιβλήματος και αν ναι, να ανιχνευτεί το πόσο ισχυρή είναι αυτή η σύνδεση [4, 29].

Μέχρι τώρα δοκιμή η οποία είναι ικανή να ελέγχει τη σύνδεση αυτή του μονωτικού περιβλήματος με τη ράβδο των συνθετικών μονωτήρων δεν υπάρχει σε κάποιο Πρότυπο, αλλά ούτε και κάποια από τις δοκιμές των διεθνών προτύπων μπορεί από μόνη της να δώσει αποτελέσματα για το αν υπάρχει αυτή η σύνδεση [159, 171, 172, 173, 174].

Γι' αυτό το λόγο τα τελευταία χρόνια γίνεται πολλή έρευνα από ερευνητές και εταιρίες, ώστε να βρεθεί μια δοκιμή για αυτόν το σκοπό και να ενσωματωθεί σε κάποιο Πρότυπο. Έχει παρατηρηθεί, από έρευνες που έχουν γίνει ότι η κακή ή η ανύπαρκτη σύνδεση μεταξύ της ράβδου και του μονωτικού περιβλήματος οδηγεί σε πολλά από τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι συνθετικοί μονωτήρες κατά τη διάρκεια της ζωής τους στο ηλεκτρικό δίκτυο και με τον καιρό προκύπτει αστοχία τους καθιστώντας απαραίτητη την άμεση αντικατάστασή τους [4, 33, 157, 172, 174, 175, 176].

Ένας πιθανός μηχανισμός της αστοχίας που μπορεί να συμβεί σε ένα συνθετικό μονωτήρα με κακή ή ανύπαρκτη σύνδεση μεταξύ του μονωτικού περιβλήματος και της ράβδου του εξηγείται παρακάτω. Αρχικά, στα σημεία που δεν είναι καλή η σύνδεση συσσωρεύεται αέρας μεταξύ της ράβδου και του μονωτικού περιβλήματος, ο οποίος με τον καιρό αντικαθίσταται από υγρασία στη μορφή ατμών λόγω του μηχανισμού της διάχυσης που συμβαίνει στο υλικό του μονωτικού περιβλήματος (silicone rubber) ή λόγω της κακής μόνωσης (σφράγισης) μεταξύ μονωτικού περιβλήματος και μεταλλικών ακροδεκτών. Έπειτα, εφόσον το επιτρέπουν οι συνθήκες, συμβαίνει συμπύκνωση των ατμών αυτών και

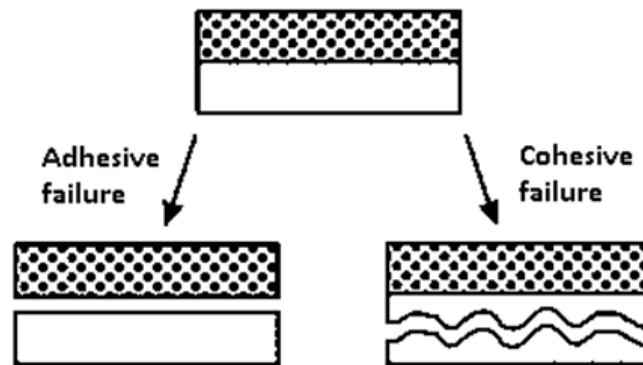
μετατροπή σε νερό. Με αυτή την κατάσταση και με την πάροδο του χρόνου ξεκινούν εσωτερικές μερικές εκκενώσεις μεταξύ της ράβδου και του μονωτικού περιβλήματος, οι οποίες οδηγούν στο σχηματισμό ενός μερικώς αγωγίμου στρώματος μεταξύ της ράβδου και του μονωτικού περιβλήματος (ή εντός της ράβδου). Το δυναμικό της υψηλής τάσης μεταφέρεται στη συνέχεια από το μεταλλικό ακροδέκτη που βρίσκεται στην πλευρά της υψηλής τάσης κατά μήκος του μονωτήρα. Το αγωγίμο μονοπάτι που δημιουργείται αυξάνει στη συνέχεια την ηλεκτρική καταπόνηση και πυροδοτεί το φαινόμενο «Corona». Το φαινόμενο «Corona» στη συνέχεια υποβαθμίζει τοπικά την υδροφοβικότητα του μονωτικού περιβλήματος και εν συνεχεία δημιουργείται διάβρωση ή διάτρηση στο περίβλημα. Ο μηχανισμός αυτός αναπαρίσταται σχηματικά στο σχήμα 2-39 [173, 175]. Τελικά, με την πάροδο του χρόνου έχουμε τη σταδιακή αύξηση αυτού του αγωγίμου μονοπατιού μεταξύ της ράβδου και του μονωτικού περιβλήματος και τη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου λόγω βραχυκυκλώματος στο χώρο μεταξύ ράβδου και μονωτικού περιβλήματος (το λεγόμενο flashunder), με συνέπεια την αστοχία του συνθετικού μονωτήρα και την άμεση ανάγκη αντικατάστασης του [173, 177]. Η ένωση αυτή μεταξύ της ράβδου και του μονωτικού περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων θα πρέπει να είναι χημική και όχι απλά μηχανική, για να αποτρέπεται αυτή η είσοδος της υγρασίας [178].



Σχήμα 2-39. Σχηματική αναπαράσταση του μηχανισμού αστοχίας των συνθετικών μονωτήρων στο ηλεκτρικό δίκτυο, λόγω κακής ή ανύπαρκτης σύνδεσης μεταξύ του μονωτικού περιβλήματος και της ράβδου [173].

Ως γενικός κανόνας για τη δοκιμή, η οποία θα προταθεί, ώστε να γίνει αποδεκτή για την ένταξη της σε κάποιο Πρότυπο, είναι το κριτήριο επιτυχίας της. Για να θεωρηθεί επιτυχής η δοκιμή αυτή και συνεπώς καλή η σύνδεση μεταξύ ράβδου και μονωτικού περιβλήματος, απαιτείται η αστοχία του περιβλήματος να είναι εντός του ίδιου του περιβλήματος, δηλαδή

να σκιστεί το μονωτικό περιβλήμα (cohesive failure) και όχι να ξεκολλήσει από τη ράβδο (adhesive failure). Αυτό φαίνεται καλύτερα στα σχήματα 2-40 και 2-41 [175].



Σχήμα 2-40. Αναπαράσταση της αποκόλλησης του περιβλήματος από τη ράβδο (adhesive failure) και του σκίσιματος του μονωτικού περιβλήματος (cohesive failure) [175].



α



β

Σχήμα 2-41. α) Αποκόλληση του περιβλήματος από τη ράβδο (adhesive failure), β) σκίσιμο του μονωτικού περιβλήματος (cohesive failure) [173].

Παρακάτω αναφέρονται διάφορες απόπειρες που έχουν γίνει ώστε να βρεθεί μια δοκιμή για τον έλεγχο της σύνδεσης ράβδου – μονωτικού περιβλήματος και να ενταχθεί σε κάποιο διεθνές Πρότυπο. Οι απόπειρες αυτές περιλαμβάνουν: α) δοκιμές που υπάρχουν ήδη στα

διεθνή Πρότυπα, β) δοκιμές οι οποίες επινοήθηκαν για το σκοπό αυτό, καθώς επίσης και γ) διάφορους συνδυασμούς μεταξύ δοκιμών. Οι δοκιμές αυτές είναι:

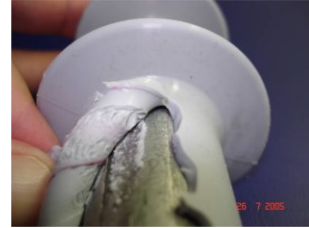
- Χάραξη και τράβηγμα λωρίδων από το μονωτικό περίβλημα του συνθετικού μονωτήρα σε οριζόντια και κατακόρυφη κατεύθυνση. Πρόκειται για δοκιμή που επινοήθηκε για το συγκεκριμένο σκοπό. Το μόνο που χρειάζεται είναι ένα μαχαίρι και μία πένσα. Κριτήριο επιτυχίας της δοκιμής είναι να σκιστεί το μονωτικό περίβλημα και όχι να αποκολληθεί κατά το τράβηγμα (σχήμα 2-42 α) [29, 172, 173].
- Χάραξη και τράβηγμα του μονωτικού περιβλήματος από τους μεταλλικούς ακροδέκτες. Το αποτέλεσμα και αυτής της δοκιμής θα πρέπει να είναι σκίσιμο του περιβλήματος και όχι αποκόλληση του (σχήμα 2-42 β) [29].
- Παρατήρηση μέσω οπτικού ελέγχου του μονωτικού περιβλήματος. Αν υπάρχουν μικρά κενά είναι δείγμα πιθανόν κακής κατασκευαστικής διαδικασίας του μονωτικού περιβλήματος και άρα κακής σύνδεσης του με τη ράβδο, αλλά και με τους μεταλλικούς ακροδέκτες (σχήμα 2-42 γ) [29].
- Ανίχνευση καλής σύνδεσης μέσω δοκιμής έλξης σε μηχανή εφελκυσμού (pull-off test). Η δοκιμή αυτή χρειάζεται ένα μαχαίρι για τη χάραξη του μονωτικού περιβλήματος κάποιων κυαθίων του μονωτήρα. Έπειτα αυτά (τα χαραγμένα τμήματα των κυαθίων) προσαρμόζονται σε μια μηχανή εφελκυσμού και ασκείται δύναμη μέχρι να κοπεί το μονωτικό περίβλημα. Πάλι εδώ θα πρέπει, για να είναι καλή η σύνδεση ράβδου – μονωτικού περιβλήματος, να σκιστεί το περίβλημα και όχι να αποκολληθεί από τη ράβδο. Επίσης, σε αυτή τη δοκιμή έχει προταθεί άλλο ένα κριτήριο, η τάση εφελκυσμού να είναι μεγαλύτερη από $1,5 \text{ N/mm}^2$ (σχήμα 2-42 δ) [171, 172, 179].
- Ανίχνευση με τη δοκιμή διατμητικής καταπόνησης (shear stress test). Δοκιμή κατά την οποία ένα μικρό κομμάτι της ράβδου πιέζεται ώστε να περάσει μέσα από μια τρύπα διαμέτρου λίγο μεγαλύτερης από τη ράβδο, ώστε το μονωτικό περίβλημα είτε να σκιστεί, είτε να αποκολληθεί. Αυτή η δοκιμή δε μπορεί να δώσει πάντα αξιόπιστα αποτελέσματα, καθώς εξαρτάται από το υλικό του μονωτικού περιβλήματος, αλλά και από το ότι η κατανομή της τάσης δεν είναι ομοιόμορφη (σχήμα 2-42 ε) [172, 179].
- Δοκιμή διείσδυσης νερού, σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 60794-1-22 [180]. Η δοκιμή αυτή δεν έδωσε καλά αποτελέσματα, καθώς ακόμα και μετά από 1500 ώρες δεν είναι ικανή να ανιχνεύσει την κακή σύνδεση μεταξύ ράβδου και μονωτικού περιβλήματος (σχήμα 2-42 ζ) [172, 179].

- Ανίχνευση μέσω μηχανικής καταπόνησης. Απαιτεί ειδικό εξοπλισμό. Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής δεν ικανοποιούν το σκοπό της ανίχνευσης σωστής σύνδεσης ράβδου - μονωτικού περιβλήματος (σχήμα 2-42 η) [172, 179].
- Ανίχνευση σωστής σύνδεσης μέσω της δοκιμής διείσδυσης βαφής (dye penetration test). Αυτή η δοκιμή εκτελείται, όπως έχει προαναφερθεί στο υποκεφάλαιο 2.2.2.2 σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 62217 (σχήμα 2-42 θ) [151]. Για αυτή τη δοκιμή άλλοι ερευνητές λένε πως δείχνει τη σωστή σύνδεση ράβδου – μονωτικού περιβλήματος [169, 170] και άλλοι ότι δεν την αποκαλύπτει [172, 179].
- Ανίχνευση με τη δοκιμή διάχυσης νερού (water diffusion test) όπως αυτή αναλύθηκε στο υποκεφάλαιο 2.2.2.1, σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 62217 [151]. Έχουν γίνει δοκιμές με το βρασμό που προηγείται της δοκιμής αυτής να διαρκεί από 42 έως και 300 ώρες. Στη συνέχεια, κατά τη δοκιμή μετράται το ρεύμα διαρροής. Έχει διαπιστωθεί ότι η τιμή του ρεύματος αυτού συσχετίζεται με το αν είναι καλή η σύνδεση μεταξύ ράβδου - μονωτικού περιβλήματος (σχήμα 2-42 ι) [158, 172, 179]. Επίσης, κάποιιοι ερευνητές ανέπτυξαν μια διάταξη, μέσω της οποίας μπορεί κανείς να ξέρει αν αυτό το ρεύμα διαρροής προέρχεται από το μονωτικό περίβλημα, από τη σύνδεση μονωτικού περιβλήματος με τη ράβδο ή από τη ράβδο [161].
- Ανίχνευση μέσω της δοκιμής steep front με κρουστική τάση με ρυθμό ανόδου 1000 kV/ μ s και 3000 kV/ μ s, με αέρα να περιβάλλει το μονωτήρα. Η δοκιμή αυτή έδειξε ότι δεν είναι ικανή να ανιχνεύσει κακή ή καθόλου σύνδεση μεταξύ ράβδου και μονωτήρα, καθώς η υπερπήδηση (το τόξο) γινόταν όχι μέσα από το υλικό του μονωτήρα, αλλά από τον περιβάλλοντα αέρα (σχήμα 2-42 κ) [159].
- Επιπλέον έχει γίνει προσπάθεια ανίχνευσης της σύνδεσης ράβδου – μονωτικού περιβλήματος με τη βοήθεια συσκευής υπερήχων, με τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής να είναι πολλά υποσχόμενα (σχήμα 2-42 λ) [181, 182].

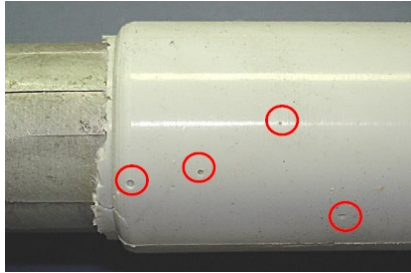
Η δοκιμή διάχυσης νερού (water diffusion test) με 100 ώρες βρασμού ακολουθούμενη από τη δοκιμή τραβήγματος (pull-off test) είναι ο επικρατέστερος συνδυασμός δοκιμών για το συγκεκριμένο σκοπό και προτείνεται από τη βιβλιογραφία να γίνει προσθήκη σε κάποιο Πρότυπο [159, 171, 172, 174].



α [173]



β [29]



γ [29]



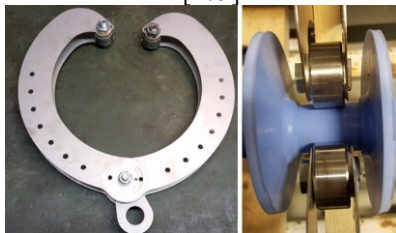
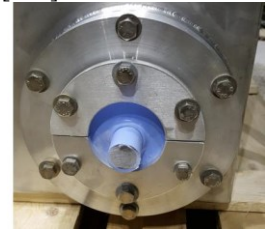
δ [179]



ε [179]



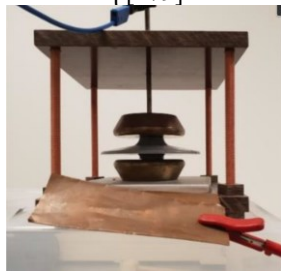
ζ [179]



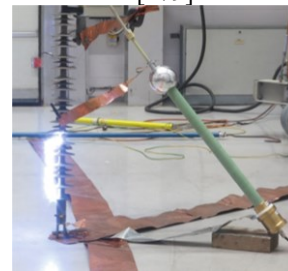
η [179]



θ [179]



ι [179]



κ [159]



λ [182]

Σχήμα 2-42. Διάφορες δοκιμές που έχουν χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της σωστής σύνδεσης ράβδου – μονωτικού περιβλήματος και ράβδου – μεταλλικών ακροδεκτών.

2.3 Δοκιμές μηχανικής αντοχής των συνθετικών μονωτήρων

Οι συνθετικοί μονωτήρες είναι διατάξεις οι οποίες εκτός από κατάλληλα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά θα πρέπει να έχουν και κατάλληλα χαρακτηριστικά μηχανικής αντοχής, ώστε να χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά δίκτυα διανομής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίστοιχα με τις υπόλοιπες δοκιμές επαλήθευσης της ποιότητας των υλικών των συνθετικών μονωτήρων, υπάρχουν και δοκιμές που σκοπό έχουν την εξακρίβωση της μηχανικής αντοχής των μονωτήρων, όπως αυτή προδιαγράφεται είτε στο φυλλάδιο προδιαγραφών των κατασκευαστών, είτε στις τεχνικές προδιαγραφές και απαιτήσεις των διαχειριστών των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας που θα αγοράσουν τους συνθετικούς μονωτήρες. Μερικές από τις δοκιμές αυτές αναλύονται στη συνέχεια.

2.3.1 Δοκιμή εφελκυσμού

Η δοκιμή εφελκυσμού (tensile load test) εφαρμόζεται κυρίως στους συνθετικούς μονωτήρες ανάρτησης, των οποίων η βασική κατηγορία φορτίων που τους ασκείται κατά τη λειτουργία τους στο ηλεκτρικό δίκτυο είναι φορτία εφελκυσμού [4].

Η δοκιμή εφελκυσμού σε συνθετικούς μονωτήρες πραγματοποιείται σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61109 [183]. Στο Πρότυπο αυτό υπάρχουν τρεις διαδικασίες που αναφέρονται σε δοκιμή συνθετικού μονωτήρα ανάρτησης υπό φορτίο εφελκυσμού για διαφορετική χρήση η καθεμιά. Συγκεκριμένα στην παράγραφο 10.4.2 του Προτύπου αναφέρεται η διαδικασία που ακολουθείται για τη δοκιμή εφελκυσμού κατά τη φάση του σχεδιασμού των συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης (design test), στην παράγραφο 11.2 αναφέρεται η αντίστοιχη διαδικασία της δοκιμής που είναι δοκιμή τύπου (type test) και πραγματοποιείται σε παρτίδες μονωτήρων οι οποίες έχουν περάσει με επιτυχία τη δοκιμή σχεδιασμού και τέλος στην παράγραφο 13.1 αναφέρεται η διαδικασία της δοκιμής η οποία εφαρμόζεται σε κάθε μονωτήρα που παράγεται (routine test). Στη συνέχεια αναλύεται, επιγραμματικά, η κάθε διαδικασία του Προτύπου για την εκτέλεση της δοκιμής [183].

Σύμφωνα με την §10.4.2 του Προτύπου η δοκιμή σχεδιασμού για άσκηση φορτίου εφελκυσμού σε συνθετικούς μονωτήρες ανάρτησης έχει ως εξής: Αρχικά, γίνεται προσδιορισμός του μέσου φορτίου αστοχίας του μονωτήρα M_{AV} σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία:

- Απαιτούνται 3 συνθετικοί μονωτήρες ανάρτησης.
- Αυξάνεται το φορτίο εφελκυσμού γρήγορα, αλλά ομαλά, μέχρι περίπου το 75% του αναμενόμενου φορτίου αστοχίας για το μονωτήρα. Αν δε μπορούμε να προσδιορίσουμε το αναμενόμενο φορτίο αστοχίας, τότε παίρνουμε έναν μονωτήρα στον οποίο αυξάνουμε σταδιακά το φορτίο εφελκυσμού μέχρι να αστοχήσει και καταγράφουμε την τιμή που αστόχησε, η οποία είναι πλέον το αναμενόμενο φορτίο αστοχίας.
- Έπειτα αυξάνεται το φορτίο εφελκυσμού σταδιακά σε χρονικό διάστημα μεταξύ 30 – 90 s μέχρι να αστοχήσει ο μονωτήρας (να σπάσει η ράβδος ή να ξεγλιστρήσει από τους μεταλλικούς ακροδέκτες).
- Σημειώνεται το φορτίο αστοχίας του καθενός από τους 3 μονωτήρες.
- Υπολογίζεται το M_{AV} που είναι η μέση τιμή τους [183].

Ακολούθως, πραγματοποιείται το 2^ο σκέλος της δοκιμής όπου:

- Απαιτούνται ακόμη 3 συνθετικοί μονωτήρες ανάρτησης.
- Αυξάνεται το φορτίο εφελκυσμού γρήγορα, αλλά ομαλά, μέχρι το 60% του φορτίου M_{AV} που υπολογίστηκε προηγουμένως.
- Διατηρείται αυτό το φορτίο εφελκυσμού στο μονωτήρα για 96h.
- Δεν πρέπει να συμβεί αστοχία στο μονωτήρα.
- Αν η δοκιμή διακοπεί για οποιοδήποτε λόγο πριν τις 96h, θα πρέπει να επαναληφθεί σε καινούριο μονωτήρα [183].

Η δεύτερη δοκιμή εφελκυσμού που αναφέρεται στο Πρότυπο περιλαμβάνεται στην §11.2 και έχει την εξής διαδικασία:

- Απαιτούνται 4 συνθετικοί μονωτήρες ανάρτησης.
- Αυξάνεται το φορτίο εφελκυσμού γρήγορα, αλλά ομαλά, μέχρι το 70% του καθορισμένου φορτίου εφελκυσμού (specified mechanical load – SML) του μονωτήρα. Το SML αναγράφεται από τον κατασκευαστή στις προδιαγραφές του μονωτήρα.
- Διατηρείται αυτό το φορτίο εφελκυσμού στο μονωτήρα για 96h.
- Δεν πρέπει να συμβεί αστοχία στο μονωτήρα.
- Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τους 4 μονωτήρες [183].

Επίσης, στη διαδικασία αυτή της δοκιμής υπάρχει μια επιπλέον προσθήκη στο Πρότυπο, κατά την οποία μετά το πέρας της δοκιμής μπορούμε να αυξήσουμε το φορτίο εφελκυσμού

μέχρι ο μονωτήρας να αστοχήσει και η τιμή αυτή να καταγραφεί. Αυτή η τιμή είναι το μέγιστο φορτίο αστοχίας του μονωτήρα (ultimate tensile stress – UTS) [183].

Τέλος, η τρίτη δοκιμή εφελκυσμού που αναφέρεται στην §13.1 του προτύπου έχει ως εξής:

- Αυτή η δοκιμή εφαρμόζεται σε όλους τους μονωτήρες.
- Κάθε μονωτήρας θα πρέπει να αντέξει χωρίς να συμβεί αστοχία ένα φορτίο εφελκυσμού τιμής $0,5 \times \text{SML} (+10) \%$ για τουλάχιστον 10 s, το οποίο αποκαλείται φορτίο δοκιμής ρουτίνας (routine test load - RTL) [183].

Όλες οι παραπάνω δοκιμές εκτελούνται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος [183].

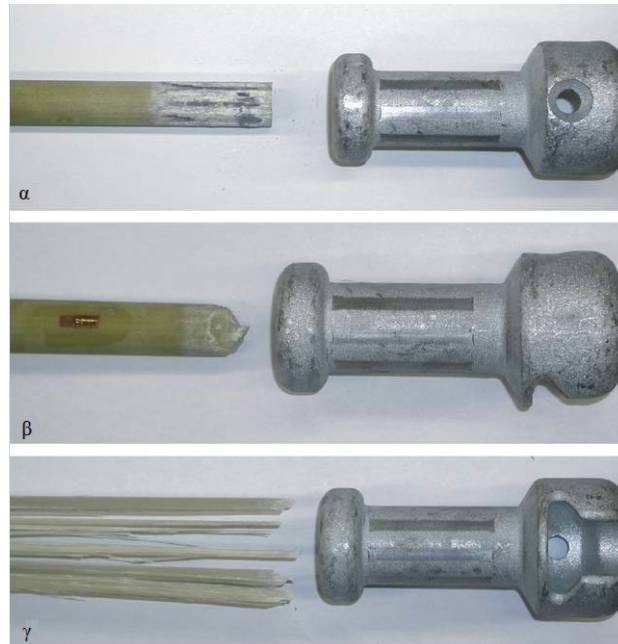
Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι, όταν πρόκειται για δοκιμές σε συνθετικούς μονωτήρες για τους οποίους θέλουμε γρήγορα και αποτελεσματικά να μάθουμε τη μηχανική αντοχή τους, θα πρέπει να επιλέγεται και να εφαρμόζεται η χειρότερη εκ των περιπτώσεων των §10.4.2 και §11.2 του προτύπου [29]. Επιπλέον, αναφορικά με το μέγιστο φορτίο αστοχίας (ultimate tensile stress – UTS), θα πρέπει αυτό να είναι μεγαλύτερο από το καθορισμένο φορτίο εφελκυσμού (specified mechanical load – SML) του συνθετικού μονωτήρα [33, 36, 184].

Ως αστοχία των συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης κατά τη δοκιμή εφελκυσμού αναφέρονται στη βιβλιογραφία το ξεγλίστρημα της ράβδου από τους μεταλλικούς ακροδέκτες (σχήμα 2-43 α) [29, 33, 185], το σπάσιμο της ράβδου (σχήμα 2-43 β) [29, 33, 185], η αποκόλληση των υαλονημάτων, μεταξύ τους, από τα οποία αποτελείται η ράβδος (σχήμα 2-43 γ) [185], και το σπάσιμο των μεταλλικών ακροδεκτών [29, 33, 185]. Αναφέρεται επίσης ότι από τους 4 αυτούς τύπους αστοχίας, οι προτιμότεροι είναι το ξεγλίστρημα της ράβδου από τους μεταλλικούς ακροδέκτες και το σπάσιμο των μεταλλικών ακροδεκτών [29, 33].

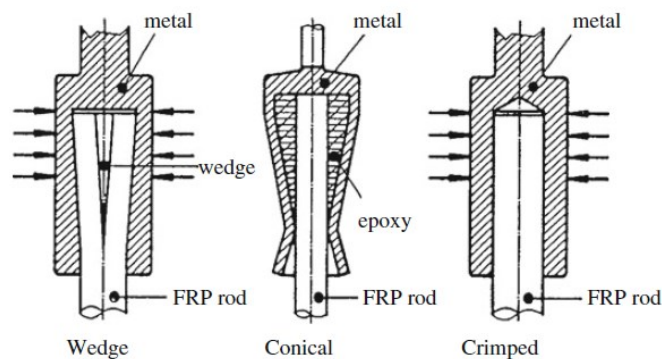
Έχει διαπιστωθεί από έρευνες που έχουν γίνει ότι η αντοχή των συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης σε μηχανικά φορτία που τους ασκούνται εξαρτάται κυρίως από τους παρακάτω παράγοντες:

- Το μέγιστο φορτίο εφελκυσμού των συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης αυξάνεται καθώς μειώνεται η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Σε έρευνα που έγινε, διαπιστώθηκε ότι το μέγιστο φορτίο εφελκυσμού εξαρτάται επίσης και από τον τύπο των μεταλλικών

ακροδεκτών που χρησιμοποιούνται κατά την κατασκευή του συνθετικού μονωτήρα. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν οι ακόλουθοι τύποι μεταλλικών ακροδεκτών: τύπου σφήνας (wedge), τύπου κώνου (conical) και τύπος πιεσμένος με πρέσα (crimped), όπως φαίνονται στο σχήμα 2-44 [4, 186].



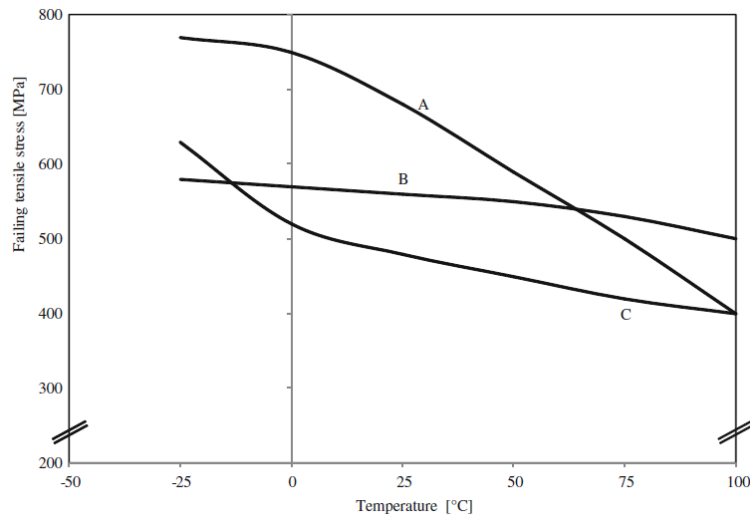
Σχήμα 2-43. Κάποιοι πιθανοί τύποι αστοχίας κατά τη δοκιμή εφελκυσμού: α) ξεγλίστρημα της ράβδου από τους μεταλλικούς ακροδέκτες, β) σπάσιμο της ράβδου, γ) αποκόλληση μεταξύ τους των υαλονημάτων από τα οποία αποτελείται η ράβδος [185].



Σχήμα 2-44. Παραδείγματα τύπων μεταλλικών ακροδεκτών που χρησιμοποιούνται σε συνθετικούς μονωτήρες ανάρτησης [4].

Στο σχήμα 2-45 φαίνεται η συσχέτιση του μέγιστου φορτίου αστοχίας με τη θερμοκρασία, σε συνθετικούς μονωτήρες με: Α) τύπου «conical» μεταλλικούς ακροδέκτες, Β) τύπου «crimped» μεταλλικούς ακροδέκτες, Γ) τύπου «wedge» μεταλλικούς ακροδέκτες. Όπως φαίνεται, οι μονωτήρες με ακροδέκτες τύπου

«crimped» εμφανίζουν τη μικρότερη ευαισθησία στις μεταβολές της θερμοκρασίας και είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται κυρίως σήμερα [4].

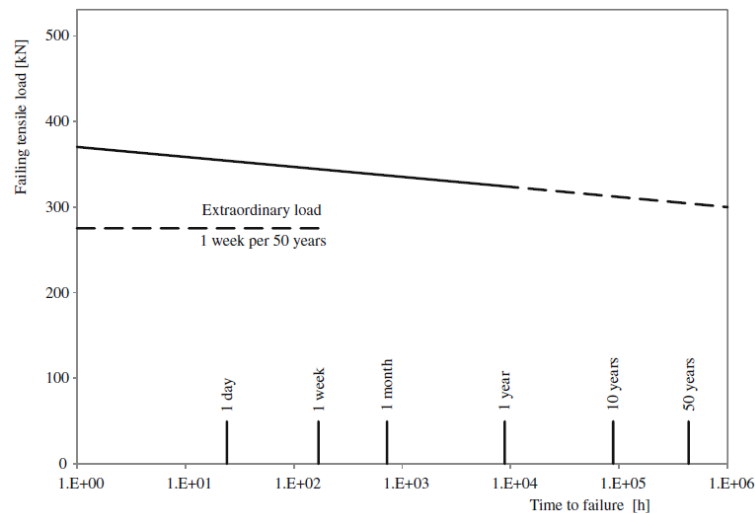


Σχήμα 2-45. Μέγιστο φορτίο αστοχίας συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης συναρτήσεως της θερμοκρασίας για συνθετικούς μονωτήρες με: Α) τύπου conical μεταλλικούς ακροδέκτες, Β) τύπου crimped μεταλλικούς ακροδέκτες, Γ) τύπου wedge μεταλλικούς ακροδέκτες [4, 186].

- Επιπλέον, έχει διαπιστωθεί ότι η αντοχή των συνθετικών μονωτήρων σε μηχανικά φορτία, καθώς επίσης και η αστοχία που ενδεχομένως να προκύψει λόγω άσκησης μηχανικών φορτίων εφελκυσμού έχει να κάνει σε μεγάλο βαθμό με τη διαδικασία και τον τρόπο που γίνεται η πίεση (crimping) από την πρέσα στους μεταλλικούς ακροδέκτες, ώστε αυτοί να συγκρατούν τη ράβδο [185, 187, 188]. Αναφέρεται ότι, αν η πρέσα ασκεί την πίεση ομοιόμορφα στους μεταλλικούς ακροδέκτες, τότε διαπιστώνεται καλύτερη απόδοση των μονωτήρων σε μηχανικά φορτία, σε αντίθεση με όταν η πίεση ασκείται ανομοιόμορφα [187]. Επίσης, έχει διαπιστωθεί ότι η χρήση συσκευής που ανιχνεύει ακουστικές εκπομπές (acoustic emissions) μπορεί να βοηθήσει κατά τη διαδικασία του crimping, καθώς είναι δυνατός ο προσδιορισμός της πίεσης στην οποία πρέπει να γίνει το crimping, χωρίς όμως να συμβεί θραύση στις γυάλινες ίνες της ράβδου. Η θραύση αυτή ανιχνεύεται μέσω της προαναφερθείσας συσκευής ανίχνευσης ακουστικών εκπομπών [185, 188, 189].
- Ακόμη, η απόδοση των συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης σε μηχανικά φορτία εξαρτάται από την ποιότητα και την αντοχή των γυάλινων ινών που περιλαμβάνονται μέσα στη ράβδο [163].
- Εξαρτάται επίσης από την προστασία της ράβδου από τις εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες [163], καθώς επίσης και από τη διάμετρο της ράβδου, ιδίως όταν

αναφερόμαστε σε κυκλικά φορτία (cyclic loads) τα οποία προσομοιώνουν τις αιολικές δονήσεις [190].

- Επιπροσθέτως, αναφέρεται στη βιβλιογραφία η εξάρτηση της μηχανικής αντοχής με τα χρόνια λειτουργίας. Συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι καθώς αυξάνονται τα χρόνια λειτουργίας του συνθετικού μονωτήρα μειώνεται το μέγιστο φορτίο εφελκυσμού, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-46 [4, 186].



Σχήμα 2-46. Μέγιστο φορτίο αστοχίας συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης συναρτήσει του χρόνου μέχρι την αστοχία για συνθετικούς μονωτήρες με τύπου «cimped» μεταλλικούς ακροδέκτες [4, 186].

Έχει βρεθεί ότι τα παραπάνω ισχύουν για τις περιπτώσεις που οι συνθετικοί μονωτήρες ανάρτησης υποβάλλονται σε συνεχές φορτίο εφελκυσμού μεγαλύτερο από το λεγόμενο «όριο αστοχίας» (damage limit) τους. Αν το φορτίο στο οποίο υποβάλλονται καθόλη τη διάρκεια ζωής τους δεν ξεπερνά αυτό το «όριο αστοχίας», τότε η μηχανική αντοχή του δεν αλλάζει ακόμα και μετά από περισσότερο από 20 χρόνια λειτουργίας [33]. Το «όριο αστοχίας» έχει υπολογιστεί από κάποιους ως 2,5 – 3,75 φορές μικρότερο φορτίο από το SML του μονωτήρα [33] και από άλλους ως 0,68 x SML [191].

Μια άλλη περίπτωση μηχανικού φορτίου εφελκυσμού σε συνθετικούς μονωτήρες ανάρτησης είναι τα κυκλικά μηχανικά φορτία τα οποία προσομοιώνουν ταλαντώσεις που δημιουργούνται: α) από τις αιολικές δονήσεις ή β) από την ταλάντευση της γραμμής που προκύπτει στην περίπτωση που το χιόνι που έχει καθίσει επάνω στον αγωγό γλιστρήσει και πέσει στη γη. Έχει διαπιστωθεί ότι μετά την άσκηση κυκλικού φορτίου 32 ± 12 kN για 2 εκατομμύρια φορές δεν υπήρξε αστοχία του συνθετικού μονωτήρα ανάρτησης [109].

Τέλος, μετά από έρευνα που έγινε διαπιστώθηκε ότι η τοποθέτηση αγωγών υψηλής θερμοκρασίας που μελετάται να υιοθετηθεί λόγω της μεγαλύτερης ικανότητας των αγωγών στη μεταφορά ενέργειας υπό υψηλή θερμοκρασία, δεν επηρεάζει τη μηχανική αντοχή των συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης οι οποίοι θα έρχονται σε επαφή με τους αγωγούς αυτούς [192].

2.3.2 Δοκιμή κάμψης

Η δοκιμή κάμψης (bending load test, cantilever load test) εφαρμόζεται κυρίως στους συνθετικούς μονωτήρες στήριξης. Κατά τη λειτουργία των συνθετικών μονωτήρων στήριξης υπό πραγματικές συνθήκες στο ηλεκτρικό δίκτυο τους ασκούνται τόσο δυνάμεις εφελκυσμού, όσο και δυνάμεις κάμψης πράγμα που καθιστά εξαιρετικά περίπλοκη τη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων τους, αλλά και των μηχανισμών αστοχίας που μπορεί να συμβούν σε αυτούς [19].

Στη συνέχεια εξηγούνται ορισμένες βασικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της μηχανικής αντοχής των συνθετικών μονωτήρων στήριξης υπό φορτία κάμψης. Αυτές είναι:

- Καθορισμένο φορτίο κάμψης (specified cantilever load – SCL) είναι το φορτίο κάμψης που ένας μονωτήρας μπορεί να αντέξει, όταν αυτό ασκείται στο μεταλλικό ακροδέκτη, στον οποίο τοποθετείται ο αγωγός κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του στο δίκτυο. Αυτή η τιμή καθορίζεται από τον κατασκευαστή. Πρέπει να σημειωθεί ότι το SCL πρέπει να θεωρείται ως τιμή αντοχής, που σημαίνει ότι ο μονωτήρας θα πρέπει να μπορεί να αντέξει αυτό το φορτίο κατά τη διάρκεια της δοκιμής [4, 193].
- Φορτίο αστοχίας κατά την κάμψη (cantilever failing load – CFL) είναι το μέγιστο φορτίο που επιτυγχάνεται κατά τη δοκιμή κάμψης στον μονωτήρα. Το φορτίο αυτό πρέπει να είναι υψηλότερο από το SCL. Αναφέρεται στη βιβλιογραφία ότι το CFL είναι 15% - 20% υψηλότερο από το SCL [4].
- Μέγιστο φορτίο κάμψης σχεδιασμού (maximum design cantilever load – MDCL) είναι το φορτίο πάνω από το οποίο ξεκινά η ζημιά στη ράβδο του μονωτήρα (μη ορατή με το μάτι) και αποτελεί το μέγιστο επιτρεπτό φορτίο που μπορεί να ασκηθεί στο συνθετικό μονωτήρα στήριξης κατά τη λειτουργία του στο ηλεκτρικό δίκτυο. Το MDCL και η κατεύθυνση άσκησης αυτού του φορτίου στο μονωτήρα καθορίζονται από τον

κατασκευαστή [4, 193]. Αναφέρεται στη βιβλιογραφία ότι το MDCL είναι περίπου το 50% του SCL [4], ή αλλιώς ότι είναι 40% - 50% του SCL [29].

Η δοκιμή κάμψης σε συνθετικούς μονωτήρες στήριξης πραγματοποιείται σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61952 [193]. Στο Πρότυπο αυτό υπάρχουν τρεις διαδικασίες που αναφέρονται σε δοκιμή συνθετικού μονωτήρα στήριξης υπό φορτίο κάμψης για διαφορετική χρήση η καθεμιά. Συγκεκριμένα στην παράγραφο 10.4.1 του προτύπου αναφέρεται η διαδικασία που ακολουθείται για τη δοκιμή κάμψης κατά τη φάση του σχεδιασμού των συνθετικών μονωτήρων στήριξης (design test), στην παράγραφο 11.2.1 αναφέρεται η αντίστοιχη διαδικασία της δοκιμής που είναι δοκιμή τύπου (type test) και πραγματοποιείται σε παρτίδες μονωτήρων οι οποίες έχουν περάσει με επιτυχία τη δοκιμή σχεδιασμού και τέλος στην παράγραφο 12.4 αναφέρεται η διαδικασία τη δοκιμής η οποία εφαρμόζεται δειγματοληπτικά σε τυχαία επιλεγμένους μονωτήρες από μια παρτίδα και μπορεί να λογίζεται επίσης και ως δοκιμή αποδοχής παρτίδας μονωτήρων (sample test). Στη συνέχεια αναλύεται η κάθε διαδικασία του προτύπου (από τις τρεις προαναφερθείσες) επιγραμματικά για την εκτέλεση της δοκιμής [193].

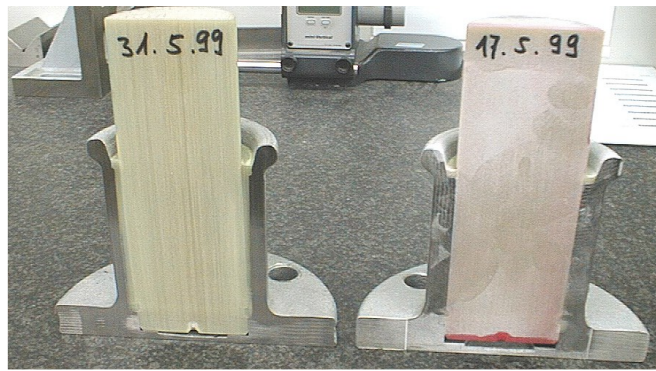
Σύμφωνα με την §10.4.1 του προτύπου, η δοκιμή σχεδιασμού για την επαλήθευση του μέγιστου φορτίου κάμψης σχεδιασμού (maximum design cantilever load – MDCL), το οποίο αναφέρεται στις προδιαγραφές του συνθετικού μονωτήρα στήριξης, μέσω άσκησης φορτίου κάμψης έχει ως εξής:

- Η δοκιμή εκτελείται σε θερμοκρασία 20 ± 10 °C.
- Η δοκιμή επαναλαμβάνεται 3 φορές, οπότε χρειάζονται 3 συνθετικοί μονωτήρες στήριξης.
- Το φορτίο κάμψης αυξάνεται βαθμιαία μέχρι 1,1 φορές το MDCL, το οποίο αναγράφεται στις προδιαγραφές του μονωτήρα. Το φορτίο θα πρέπει να εφαρμοστεί στον μεταλλικό ακροδέκτη που τοποθετείται ο αγωγός κατά την τοποθέτηση του μονωτήρα στο δίκτυο, με κατάλληλη κατεύθυνση για τους ακροδέκτες και κάθετα στη ράβδο του μονωτήρα.
- Αυτό το φορτίο διατηρείται για 96h [193].

Μετά την αφαίρεση του φορτίου:

- Επιθεωρείται οπτικά ο ακροδέκτης της βάσης για ρωγμές ή μόνιμη παραμόρφωση.

- Γίνεται έλεγχος ότι τα σπειρώματα του ακροδέκτη της βάσης μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν και δεν έχουν υποστεί ζημιά.
- Στη συνέχεια, ο μονωτήρας κόβεται κάθετα στον πυρήνα, 50 mm από τον ακροδέκτη της βάσης.
- Έπειτα κόβεται πάλι κατά μήκος του πυρήνα, στην ευθεία που ασκήθηκε η δύναμη κάμψης.
- Τα κομμένα μέρη τρίβονται με γυαλόχαρτο (μεγέθους 180 για να λειανθούν).
- Επιθεωρούνται οπτικά τα κομμένα μέρη για ρωγμές και αποκόλληση.
- Εκτελείται δοκιμή διείσδυσης βαφής (dye penetration test) στις επιφάνειες κοπής για να αποκαλυφθούν οι ρωγμές [193], όπως φαίνεται στο σχήμα 2-47 [29].



Σχήμα 2-47. Κοπή ράβδου μετά τη δοκιμή επαλήθευσης της τιμής του MDCL χωρίς (αριστερά) και με διείσδυση βαφής (δεξιά). Η δοκιμή ήταν επιτυχής. Δεν υπάρχουν ρωγμές [29].

Για να θεωρηθεί επιτυχής η συγκεκριμένη δοκιμή θα πρέπει:

1. Να μη συμβεί αστοχία του μονωτήρα κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της δοκιμής.
2. Να μην υπάρχουν ρωγμές ή μόνιμες παραμορφώσεις στον ακροδέκτη της βάσης.
3. Τα σπειρώματα του ακροδέκτη βάσης να μην έχουν υποστεί ζημιά.
4. Να μην υπάρχουν ρωγμές ή αποκόλληση των γυάλινων ινών της ράβδου (delamination) σε οποιονδήποτε από τους 3 εξεταζόμενους μονωτήρες [193].

Σύμφωνα με την §11.2.1 του προτύπου η δοκιμή τύπου (type test) για τον προσδιορισμό του φορτίου αστοχίας κατά την κάμψη (cantilever failing load – CFL) μέσω άσκησης φορτίου κάμψης έχει ως εξής:

- Η δοκιμή εκτελείται σε θερμοκρασία 20 ± 10 °C.
- Η δοκιμή επαναλαμβάνεται 3 φορές, οπότε χρειάζονται 3 συνθετικοί μονωτήρες στήριξης.

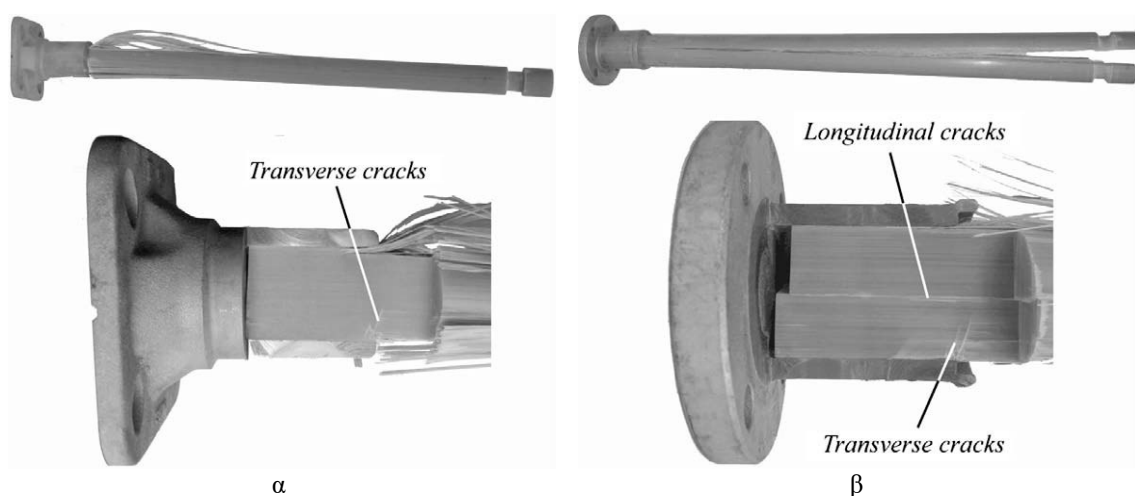
- Το φορτίο κάμψης θα πρέπει να εφαρμόζεται στην κατεύθυνση που προβλέπεται κατά τη διάρκεια λειτουργίας του μονωτήρα στο δίκτυο.
- Το φορτίο κάμψης θα πρέπει να αυξηθεί γρήγορα, αλλά ομαλά, από το 0% μέχρι το 75% του SCL (Specified Cantilever Load) και στη συνέχεια θα πρέπει να αυξηθεί σταδιακά σε χρονικό διάστημα μεταξύ 30 και 300 s μέχρι να συμβεί θραύση είτε της ράβδου, είτε των ακροδεκτών του συνθετικού μονωτήρα.
- Πρέπει να λαμβάνονται προφυλάξεις ώστε η κατεύθυνση εφαρμογής του φορτίου να διατηρείται όσο το δυνατόν παράλληλα προς την αρχική κατεύθυνση εφαρμογής του.
- Το CFL είναι το μέγιστο φορτίο που μετριέται κατά τη διάρκεια της δοκιμής.
- Ο τρόπος αστοχίας καταγράφεται στην έκθεση δοκιμής.
- Οι τρεις τιμές της παραμέτρου CFL που λαμβάνονται από τους 3 μονωτήρες θα πρέπει να είναι μεγαλύτερες από το SCL των προδιαγραφών των μονωτήρων [193].

Σύμφωνα με την §12.4 του προτύπου η δοκιμή δειγματοληψίας (sample test, λογίζεται και ως δοκιμή αποδοχής παρτίδας – acceptance test) για την επαλήθευση του καθορισμένου φορτίου κάμψης (specified cantilever load – SCL) μέσω άσκησης φορτίου κάμψης έχει ως εξής:

- Ο αριθμός των μονωτήρων που θα εξετασθούν, εξαρτάται από τον αριθμό των μονωτήρων της παρτίδας κατά την παραγγελία και ορίζεται από το Πρότυπο IEC 61952 [193].
- Το φορτίο κάμψης εφαρμόζεται στον μονωτήρα στη θέση του αγωγού, κατά την κατεύθυνση που προβλέπεται κατά τη λειτουργία του μονωτήρα στο δίκτυο.
- Το φορτίο αυξάνεται γρήγορα, αλλά ομαλά, από το 0% έως το 75% περίπου του SCL και στη συνέχεια αυξάνεται σταδιακά σε χρονικό διάστημα μεταξύ 30 και 90 s, έως ότου επιτευχθεί το SCL (το SCL δίνεται από τον κατασκευαστή).
- Εάν το φορτίο SCL επιτευχθεί σε λιγότερο από 90 s, το φορτίο πρέπει να διατηρηθεί για το υπόλοιπο των 90 s.
- Πρέπει να λαμβάνονται προφυλάξεις, ώστε η κατεύθυνση εφαρμογής του φορτίου να διατηρείται όσο το δυνατόν παράλληλα προς την αρχική κατεύθυνση εφαρμογής του φορτίου.
- Προκειμένου να ληφθούν περισσότερες πληροφορίες από τη δοκιμή, το φορτίο μπορεί στη συνέχεια να αυξηθεί έως ότου συμβεί καταστροφή (σπάσιμο) της ράβδου ή θραύση του ακροδέκτη του μονωτήρα.

- Οι τιμές φορτίου αστοχίας και οι τρόποι αστοχίας καταγράφονται [193].

Έχει διαπιστωθεί ότι στους συνθετικούς μονωτήρες στήριξης δεν είναι πάντα εμφανής η αστοχία στη ράβδο τους λόγω άσκησης μεγαλύτερου μηχανικού φορτίου από εκείνο που μπορούν να αντέξουν. Λόγω της κατασκευής της ράβδου των συνθετικών μονωτήρων, αν το φορτίο ξεπεράσει το φορτίο που αυτοί είναι ικανοί να αντέξουν τότε ξεκινούν να δημιουργούνται ρωγμές στη ράβδο. Έχει παρατηρηθεί από έρευνες ότι οι ρωγμές αυτές δημιουργούνται στην περιοχή ακριβώς στη βάση του μονωτήρα (κάθετα στη ράβδο που βρίσκεται μέσα από το μεταλλικό ακροδέκτη) από την πλευρά που η δύναμη κάμψης ανάγκαζε τη ράβδο να υφίσταται συμπίεση (compression), όπως φαίνεται στο σχήμα 2-48 α. Επίσης, υπάρχει περίπτωση οι ρωγμές αυτές να δημιουργηθούν κατά μήκος της ράβδου του μονωτήρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-48 β. Στη συνέχεια, αφού έχουν δημιουργηθεί αυτές οι ρωγμές σε μονωτήρα που βρίσκεται σε λειτουργία στο δίκτυο, ενδέχεται να αρχίσουν στο σημείο των ρωγμών μερικές εκκενώσεις οι οποίες μετά από ένα διάστημα θα έχουν αρνητικές συνέπειες για τα ηλεκτρικά και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του μονωτήρα [4, 21, 29, 194].



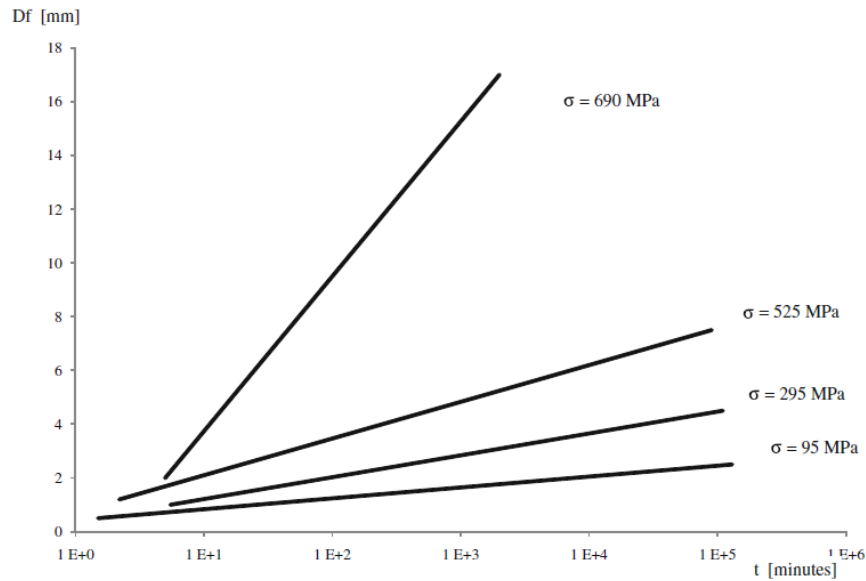
Σχήμα 2-48. α) Κάθετη ρωγμή και β) διαμήκης ρωγμή στη ράβδο συνθετικού μονωτήρα στήριξης εντός του μεταλλικού ακροδέκτη (στην πλευρά που η δύναμη κάμψης ανάγκαζε τη ράβδο να υφίσταται δύναμη συμπίεσης) μετά από άσκηση φορτίου κάμψης [195].

Έχει παρατηρηθεί επίσης μετά από έρευνα ότι καθώς αυξανόταν ο χρόνος κατά τον οποίο ασκούταν μια σταθερή δύναμη κάμψης σε συνθετικό μονωτήρα στήριξης (μήκους 1 m και διαμέτρου ράβδου 63 mm), αυξανόταν η μετατόπιση (deflection) του άκρου του συνθετικού μονωτήρα στήριξης, στο οποίο ασκείται η δύναμη, από την αρχική του θέση. Τα παραπάνω φαίνονται στο σχήμα 2-49 [4, 194, 196].

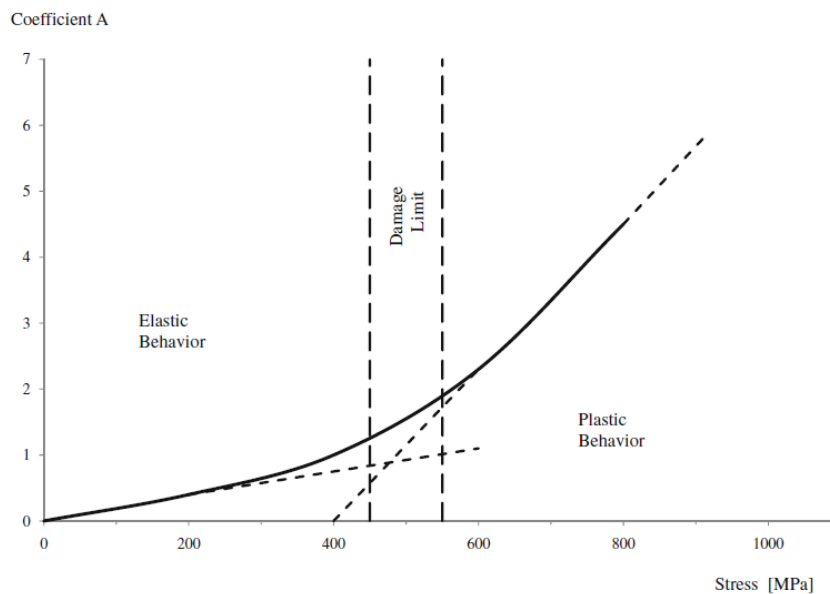
Η αλλαγή Δf της μετατόπισης (deflection) μετρήθηκε με την πάροδο χρόνου t . Εάν τα αποτελέσματα της μέτρησης απεικονιστούν ημι-λογαριθμικά (σχήμα 2-49), υπάρχει μια οικογένεια καμπυλών που ακολουθούν την εξίσωση 2-3 [4]:

$$\Delta f = A \log t \quad (2-3)$$

Οι τιμές του συντελεστή A φαίνονται στο σχήμα 2-50.



Σχήμα 2-49. Αλλαγή στη μετατόπιση (deflection) σε συνάρτηση με το χρόνο με άσκηση φορτίου κάμψης διαφόρων τιμών σε συνθετικούς μονωτήρες στήριξης (μήκους 1 m και διαμέτρου ράβδου 63 mm) [4, 196].



Σχήμα 2-50. Συντελεστής A υπό φορτίο κάμψης [4, 196].

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2-50, όταν σε ένα συνθετικό μονωτήρα στήριξης (μήκους 1 m και διαμέτρου ράβδου 63 mm) ασκηθεί δύναμη κάμψης μικρότερη από περίπου 500 MPa, τότε μετά την άσκηση της δύναμης αυτής, αν επέλθει ένας χρόνος χαλάρωσης για το μονωτήρα, τότε αυτός επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση. Πάνω από την τιμή των 500 MPa αλλά κάτω από τα 800 MPa στα οποία συμβαίνει η καταστροφή του μονωτήρα, παρατηρήθηκε ότι η μετατόπιση (deflection) μειώθηκε αισθητά μετά από κάποιο χρόνο χαλάρωσης, αλλά διατηρείται μια μόνιμη παραμόρφωση στο μονωτήρα, η οποία εξαρτάται από το μέγεθος και τη διάρκεια του φορτίου που εφαρμόζεται [4].

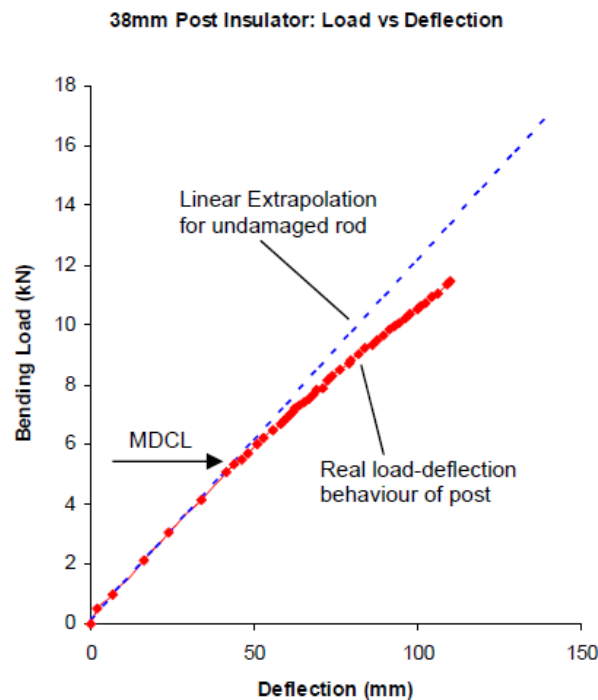
Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι οι ράβδοι των συνθετικών μονωτήρων από πλαστικό ενισχυμένο με υαλονήματα (glass fiber reinforced plastic rods – GFRP rods) και κατά συνέπεια οι συνθετικοί μονωτήρες στήριξης έχουν παρόμοια συμπεριφορά με ένα όλκιμο μεταλλικό υλικό, το οποίο υπόκειται σε φορτίο κάμψης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Δηλαδή, όπως φαίνεται και από το σχήμα 2-50, οι συνθετικοί μονωτήρες στήριξης σε χαμηλές δυνάμεις κάμψης παρουσιάζουν ελαστική παραμόρφωση και σε μεγαλύτερες δυνάμεις σχεδόν πλαστική παραμόρφωση. Η τιμή της δύναμης που διαχωρίζει τις δύο αυτές φάσεις είναι το όριο φορτίου αστοχίας (damage limit load), το οποίο δε θα πρέπει να ξεπερνιέται κατά τη λειτουργία του μονωτήρα στο δίκτυο [4, 195]. Για το όριο φορτίου αστοχίας αναφέρεται στη βιβλιογραφία ότι θα πρέπει να είναι 0,6 – 0,8 φορές το SCL [4] ενώ αλλού αναφέρεται ότι θα πρέπει να είναι 0,55 φορές το SCL [191]. Επίσης αναφέρεται ότι το όριο φορτίου αστοχίας είναι περίπου 25% μεγαλύτερο του MDCL [4].

Επιπλέον, έχει βρεθεί ότι το μέγιστο φορτίο κάμψης σχεδιασμού (maximum design cantilever load – MDCL) είναι σχετικά εύκολο να προσδιοριστεί μέσω της γραφικής παράστασης φορτίου κάμψης – μετατόπισης (deflection) ενός συνθετικού μονωτήρα στήριξης. Συγκεκριμένα η τιμή του MDCL εντοπίζεται στο σημείο, όπου γίνεται αλλαγή της κλίσης στη συγκεκριμένη καμπύλη, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-51 [29].

Στους συνθετικούς μονωτήρες στήριξης ασκούνται εκτός από φορτία κάμψης και δυναμικά φορτία λόγω δονήσεων που δημιουργούνται π.χ. από τον άνεμο ή από την πτώση του πάγου και του χιονιού, όταν αυτά συσσωρεύονται επάνω στον αγωγό της εναέριας γραμμής ηλεκτρικής ενέργειας. Από έρευνα που έγινε βρέθηκε ότι υπό δυναμικά φορτία το όριο φορτίου αστοχίας (damage limit load) σε συνθετικούς μονωτήρες στήριξης είναι χαμηλότερο από ότι υπό στατικά φορτία (ασκούνται κυρίως λόγω του βάρους του αγωγού).

Παρόλα αυτά δεν υπάρχει ισχυρή απόδειξη ότι τα δυναμικά φορτία κάμψης είναι δυσμενέστερα από τα στατικά [197].

Τέλος, έχουν γίνει προσπάθειες ώστε να ενσωματωθεί στις δοκιμές αυτές αισθητήρας ανίχνευσης ακουστικών εκπομπών (acoustic emission sensor), ώστε να γίνεται αντιληπτό πότε συμβαίνει αστοχία στη ράβδο [195, 198].



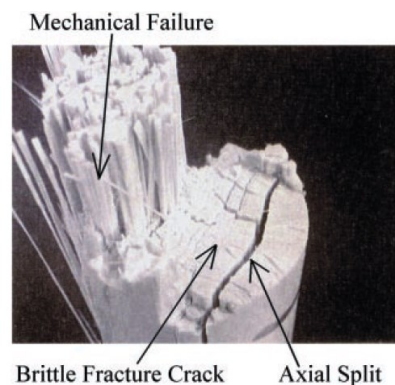
Σχήμα 2-51. Φορτίο κάμψης συναρτήσει της μετατόπισης (deflection) και προσδιορισμός του MDCL στο σημείο αλλαγής κλίσης της καμπύλης [29].

2.3.3 Δοκιμή οξέος για τον έλεγχο του ECR glass (Corrosion-resistant glass fibre for electrotechnical applications)

Κατά τα πρώτα χρόνια χρήσης των συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης στο δίκτυο παρατηρήθηκαν κάποιες αστοχίες οι οποίες οδηγούσαν στο σπάσιμο της ράβδου του συνθετικού μονωτήρα και κατά συνέπεια στην πτώση των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας. Οι αστοχίες αυτές, γνωστές ως «brittle fracture», χαρακτηρίζονται ως πολύ απρόβλεπτες και έχει παρατηρηθεί ότι συμβαίνουν στη λειτουργία των συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης στο ηλεκτρικό δίκτυο ακόμα και όταν αυτοί είναι επιφορτισμένοι με αρκετά μικρά μηχανικά φορτία [199, 200, 201]. Παράδειγμα brittle fracture στη ράβδο συνθετικού μονωτήρα φαίνεται στο σχήμα 2-52.

Έπειτα από έρευνες διαπιστώθηκε ότι η αιτία των αστοχιών αυτών είναι τα διάφορα οξέα που δημιουργούνται κατά τη λειτουργία των συνθετικών μονωτήρων στο δίκτυο. Συγκεκριμένα αναφέρεται ότι τα οξέα αυτά είναι:

- το νιτρικό οξύ (nitric acid), το οποίο δημιουργείται από τη συνδυαστική δράση των ηλεκτρικών εκκενώσεων Corona που συμβαίνουν στους συνθετικούς μονωτήρες κατά τη λειτουργία τους στο δίκτυο και του νερού ή της υγρασίας που ενδεχομένως συσσωρεύεται μεταξύ του μονωτικού περιβλήματος και της ράβδου των συνθετικών μονωτήρων [203, 204],
- το θειικό οξύ (sulfuric acid), το οποίο μπορεί να προέρχεται από την όξινη βροχή [203, 204]
- και το καρβοξυλικό οξύ (carboxylic acid), το οποίο διαπιστώθηκε ότι προέρχεται από τη σύνθεση της ράβδου (τα συστατικά στοιχεία της ράβδου) [204].

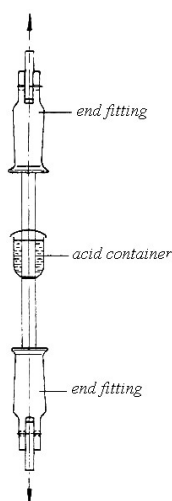


Σχήμα 2-52. Παράδειγμα αστοχίας «brittle fracture» σε συνθετικό μονωτήρα ανάρτησης [202].

Επίσης ερευνήθηκε και διαπιστώθηκε ότι το νερό από μόνο του χωρίς την παρουσία ηλεκτρικού πεδίου δεν είναι δυνατόν να προκαλέσει brittle fracture σε ένα συνθετικό μονωτήρα ανάρτησης [205], σε αντίθεση με την άποψη που είχε διατυπωθεί παλαιότερα ότι το νερό είναι πιο πιθανό να προκαλέσει brittle fracture σε σύγκριση με τα οξέα [206].

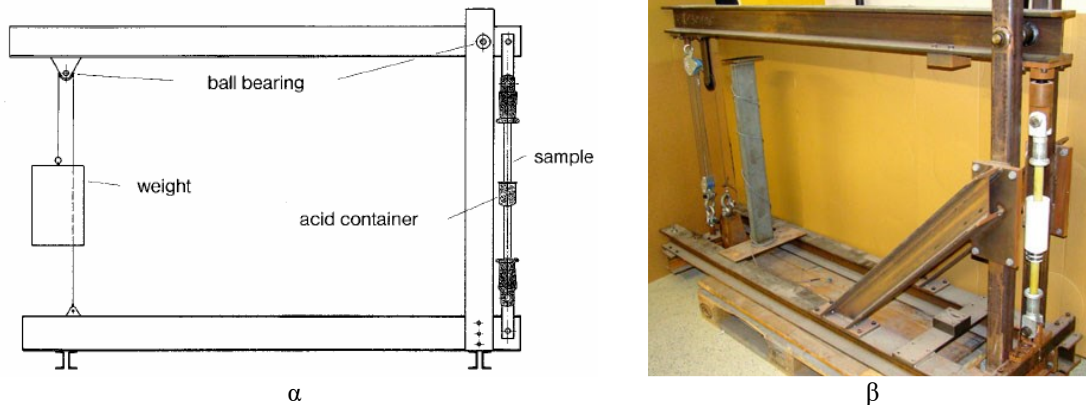
Ένας τρόπος με τον οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί μια δοκιμή η οποία να προσομοιώνει το φαινόμενο αυτό του «brittle fracture» περιγράφεται στο Πρότυπο IEC 62039 [133]. Επίσης, η δοκιμή αυτή εξηγείται πιο διεξοδικά στην τεχνική οδηγία της Cigre με αριθμό 255 [207] και στην τεχνική προδιαγραφή GSCC010 των εταιρειών του ομίλου ENEL [208].

Σύμφωνα με τα παραπάνω Πρότυπα, τεχνικές οδηγίες και προδιαγραφές η δοκιμή αυτή πραγματοποιείται σε συνθετικούς μονωτήρες ανάρτησης. Ουσιαστικά, πρόκειται για ένα συνδυασμό της μηχανικής δοκιμής τύπου (type test) σε φορτίο εφελκυσμού που αναφέρεται στο Πρότυπο IEC 61109 [183] με μια δοκιμή διάβρωσης της ράβδου με νιτρικό οξύ. Η διαδικασία της δοκιμής έχει ως εξής: επιλέγεται ένας μονωτήρας από τη γραμμή παραγωγής ή από την παρτίδα προς αγορά, του οποίου το μήκος της ράβδου είναι τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερο από τη διάμετρο της. Αφαιρείται εντελώς το μονωτικό περίβλημα του μονωτήρα από το μεσαίο τμήμα της ράβδου σε ένα μήκος τουλάχιστον 150 mm και στη συνέχεια η ράβδος σε εκείνο το σημείο λειαινείται με τη χρήση ενός γυαλόχαρτου νούμερου 180. Θα πρέπει στο σημείο αυτό της ράβδου να μην έχει μείνει κανένα κομματάκι του μονωτικού περιβλήματος. Στη συνέχεια, τοποθετείται στο σημείο εκείνο της ράβδου ένα δοχείο από πολυαιθυλένιο, το οποίο περιβάλλει τη ράβδο και μέσα σε αυτό τοποθετείται νιτρικό οξύ (HNO_3) με συγκέντρωση 1N (δηλαδή 63 γραμμάρια νιτρικού οξέος και 937 γραμμάρια νερού), όπως φαίνεται στο σχήμα 2-53. Το δοχείο αυτό θα πρέπει να περιβάλλει τη ράβδο με τέτοιο τρόπο, ώστε το οξύ να διατηρείται μέσα σε αυτό και να μην υπάρχει περίπτωση διαρροής και επαφής του οξέος με τους μεταλλικούς ακροδέκτες του μονωτήρα. Επίσης, οι διαστάσεις του δοχείου αυτού θα πρέπει να είναι τέτοιες, ώστε το περικλειόμενο σημείο της ράβδου από το δοχείο να είναι πλήρως εμβαπτισμένο σε πάχος διαλύματος τουλάχιστον 1 cm και σε ύψος διαλύματος τουλάχιστον 4 cm [133, 207, 208].



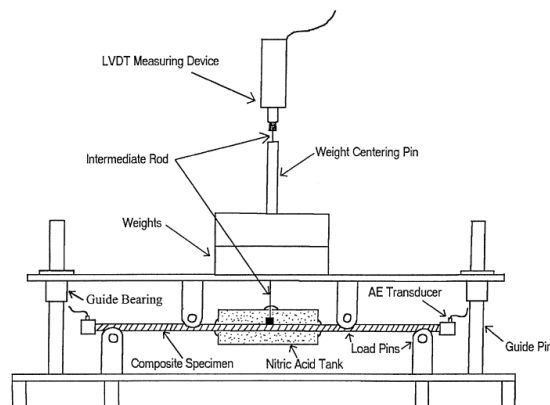
Σχήμα 2-53. Δοχείο με το διάλυμα οξέος τοποθετημένο στη ράβδο συνθετικού μονωτήρα ανάρτησης κατά τη δοκιμή οξέος [207].

Στη συνέχεια ο μονωτήρας τοποθετείται σε μηχανή εφελκυσμού και του ασκείται τάση εφελκυσμού τιμής 340 MPa [133, 207] ή 70% του καθορισμένου φορτίου εφελκυσμού (specified mechanical load – SML) [208] για 96 ώρες, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-54. Η θερμοκρασία κατά την εκτέλεση της δοκιμής θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 15 °C και 20 °C [207] ή να είναι θερμοκρασία περιβάλλοντος [208].



Σχήμα 2-54. α) Σχηματική αναπαράσταση [200, 207] και β) πραγματική φωτογραφία της διάταξης δοκιμής οξέος στη ράβδο του συνθετικού μονωτήρα ανάρτησης [4].

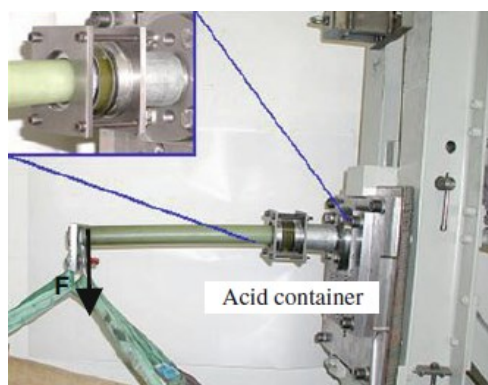
Επίσης, στη βιβλιογραφία έχει χρησιμοποιηθεί άλλη μία διάταξη για αυτή τη δοκιμή, η λεγόμενη διάταξη κάμψης τεσσάρων σημείων (four-point bend fixture), όπως φαίνεται στο σχήμα 2-55 [209, 210, 211].



Σχήμα 2-55. Διάταξη κάμψης τεσσάρων σημείων (four-point bend fixture) [209].

Για να είναι επιτυχής η δοκιμή, δε θα πρέπει να έχει συμβεί σπάσιμο στη ράβδο (brittle fracture) μετά το πέρας των 96 ωρών [133, 207, 208]. Επίσης, δε θα πρέπει να φαίνεται διάβρωση με οπτική επιθεώρηση στο υλικό της ράβδου [208]. Αν συμβεί σπάσιμο της ράβδου, καταγράφεται ο χρόνος που πέρασε μέχρι να συμβεί το σπάσιμο [207].

Η δοκιμή αυτή δεν είναι απαραίτητο να εφαρμόζεται σε συνθετικούς μονωτήρες στήριξης, καθώς έχει αναφερθεί μόνο μία φορά στη βιβλιογραφία ότι συνέβη brittle fracture σε αυτό τον τύπο μονωτήρων, οπότε θεωρείται πολύ σπάνια περίπτωση [199]. Επίσης, έχει γίνει έρευνα προσαρμογής της δοκιμής αυτής σε συνθετικούς μονωτήρες στήριξης. Συγκεκριμένα εκτελέστηκε η δοκιμή αυτή με την τροποποιημένη διάταξη του σχήματος 2-56 σε συνθετικούς μονωτήρες στήριξης με διάμετρο ράβδου 63 mm και υλικό κατασκευής E-glass σε φορτίο ίσο με 1,1 φορές το μέγιστο φορτίο κάμψης σχεδιασμού (maximum design cantilever load – MDCL). Το αποτέλεσμα ήταν ότι οι μονωτήρες αυτοί πέρασαν με επιτυχία τη δοκιμή. Οπότε συμπεραίνεται ότι υπάρχει μικρό ρίσκο να συμβεί brittle fracture σε συνθετικούς μονωτήρες στήριξης [4].



Σχήμα 2-56. Τροποποιημένη διάταξη της δοκιμής οξέος για εφαρμογή της σε συνθετικούς μονωτήρες στήριξης [4].

Με τη βοήθεια της συγκεκριμένης δοκιμής έχει γίνει πολλή έρευνα σχετικά με το υλικό που θα πρέπει να χρησιμοποιείται στις ράβδους των συνθετικών μονωτήρων, από τη στιγμή που διαπιστώθηκε ότι υπήρχαν πολλές αστοχίες συνθετικών μονωτήρων στα ηλεκτρικά δίκτυα λόγω brittle fracture. Οι έρευνες κατέληξαν ότι τα καλύτερα υλικά τα οποία περνούν με επιτυχία τη δοκιμή αυτή είναι το ECR ή E-CR glass (Corrosion-resistant glass fibre for electrotechnical use) για τις ίνες γυαλιού, σε συνδυασμό με εποξική ρητίνη (epoxy resin) ή ρητίνη βινυλεστέρα (vinyl ester resin) [4, 29, 210, 211]. Επίσης, βρέθηκε ότι το παλαιότερα χρησιμοποιούμενο υλικό κατασκευής των ράβδων, το E glass, όταν κατασκευάζεται χωρίς βόριο, περνάει τη δοκιμή αυτή επιτυχώς ανεξάρτητα από το υλικό της ρητίνης που χρησιμοποιείται [200, 212].

Πλέον πολλοί διαχειριστές δικτύων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ενσωματώνουν στις τεχνικές προδιαγραφές τους την απαίτηση για κατασκευή της ράβδου των συνθετικών μονωτήρων που παραγγέλνουν με τα παραπάνω υλικά [4]. Επιπλέον,

αναφέρεται ότι, για να αποφεύγεται το φαινόμενο του brittle fracture, θα πρέπει σε συνδυασμό με τα ποιοτικά υλικά της ράβδου των μονωτήρων να γίνεται πολύ καλή στεγανοποίηση της ράβδου, ώστε να αποφεύγεται η συσσώρευση υγρασίας και να λαμβάνονται μέτρα για την ελαχιστοποίηση των εκκενώσεων Corona στους μονωτήρες [29].

Συμπερασματικά η δοκιμή αυτή μπορεί να χρησιμοποιείται, για να διαπιστώνεται εύκολα και γρήγορα, εάν οι ίνες γυαλιού από τις οποίες αποτελείται η ράβδος είναι αυτές που έχουν ζητηθεί κατά την παραγγελία ή αν είναι αυτές που αναφέρουν οι προδιαγραφές των μονωτήρων [29].

2.4 Ελληνικές διδακτορικές διατριβές σχετικές με μονωτήρες ηλεκτρικών δικτύων

Εκτίθεται η έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί σε θέματα που άπτονται των μονωτήρων γραμμών μεταφοράς και διανομής των ηλεκτρικών δικτύων στα πλαίσια ελληνικών διδακτορικών διατριβών. Πιο συγκεκριμένα, το 2006, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της συμπεριφοράς των πορσελάνινων μονωτήρων χωρίς και με επικαλύψεις από το υλικό room temperature vulcanized silicone rubber (RTV SIR) σχετικά με το ρεύμα διαρροής που εμφανίζουν αυτοί σε συνθήκες πραγματικής λειτουργίας, αλλά και σε εργαστηριακές συνθήκες [213]. Το 2007 πραγματοποιήθηκαν πειράματα, αλλά και προσομοιώσεις σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με σκοπό τη διεξοδική μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς πορσελάνινων αλυσοειδών μονωτήρων που χρησιμοποιούνται στο ελληνικό ηλεκτρικό δίκτυο υψηλής και υπερυψηλής τάσης [214]. Αργότερα, το 2010, μελετήθηκε το πως επιδρά η υγρασία στην διηλεκτρική αντοχή μονωτικών επιφανειών υπό κρουστικές τάσεις και ανομοιογενές ηλεκτρικό πεδίο [215]. Στη συνέχεια το 2012 διερευνήθηκαν και ταξινομήθηκαν περισσότερες από 100.000 κυματομορφές ρευμάτων διαρροής, που λήφθηκαν σε περίοδο που ξεπερνάει τα 10 χρόνια, από πορσελάνινους μονωτήρες (χωρίς και με επικάλυψη RTV SIR) και από συνθετικούς μονωτήρες, οι οποίοι βρίσκονταν σε κανονική λειτουργία [216]. Τέλος, το 2019 έγιναν μελέτες στο υλικό συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης οι οποίοι είχαν υποστεί φυσική γήρανση υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της συσχέτισης των ηλεκτρικών εκκενώσεων με τα πολυμερή υλικά, αλλά και των μηχανισμών γήρανσης που επιδρούν στους υπαίθριους συνθετικούς μονωτήρες [217].

Κεφάλαιο 3. Δοκιμές ελέγχου ποιότητας και μοντέλα προσομοίωσης σε συνθετικούς μονωτήρες

Για τους σκοπούς της διδακτορικής αυτής διατριβής χρησιμοποιήθηκε πλήθος συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης και στήριξης, στους οποίους πραγματοποιήθηκαν δοκιμές τόσο για τη διερεύνηση της ποιότητας των υλικών τους, όσο και για τη βελτιστοποίηση των δοκιμών αυτών. Επίσης, σε κάποιες από τις δοκιμές, που πραγματοποιήθηκαν στους μονωτήρες, αναπτύχθηκαν μοντέλα, τόσο νευρωνικών δικτύων, όσο και προσομοίωσης ηλεκτρικού πεδίου.

3.1 Συνθετικοί μονωτήρες του ελληνικού ηλεκτρικού δικτύου διανομής που συμμετέχουν στο πρόγραμμα δοκιμών

Στο πλαίσιο της διδακτορικής αυτής διατριβής συλλέχθηκαν συνθετικοί μονωτήρες από το ελληνικό ηλεκτρικό δίκτυο διανομής, με τη βοήθεια του ΔΕΔΔΗΕ (Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας), οι οποίοι έχουν τα παρακάτω γενικά χαρακτηριστικά:

- Οι μονωτήρες, που συλλέχθηκαν, ήταν συνθετικοί μονωτήρες μέσης τάσης (24 kV).
- Οι μονωτήρες αυτοί ήταν κατασκευασμένοι από διαφορετικά εργοστάσια και εταιρείες.
- Οι τύποι των μονωτήρων αυτών ήταν: ανάρτησης και στήριξης.
- Συλλέχθηκαν καινούριοι μονωτήρες, που είχε αγοράσει για να χρησιμοποιήσει ο ΔΕΔΔΗΕ, αλλά και μεταχειρισμένοι, έπειτα από την αποξήλωση τους από το ελληνικό ηλεκτρικό δίκτυο μέσης τάσης, όπου και λειτουργούσαν για διαφορετική χρονική διάρκεια ο καθένας.
- Για όλους τους μονωτήρες που συλλέχθηκαν ισχύει ότι: κατά τη στιγμή της παραγγελίας τους από τους κατασκευαστές υπήρχε η απαίτηση να πληρούν την τεχνική προδιαγραφή της ΔΕΗ (Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού) ΔΔ – 204/20.11.2008 [218], η οποία καθορίζει τα υλικά, τα ηλεκτρικά και τα μηχανικά χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχουν, όπως επίσης και όλα τα διεθνή πρότυπα με τα οποία θα πρέπει αυτοί οι μονωτήρες να συμμορφώνονται.

- Σύμφωνα με τις προδιαγραφές των κατασκευαστών όλων των μονωτήρων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη διδακτορική διατριβή, το υλικό του μονωτικού περιβλήματος τους ήταν το βουλκανισμένο σε υψηλή θερμοκρασία (high temperature vulcanized (HTV)) σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) με πρόσμιξη σε τριένυδρη αλουμίνα (aluminum trihydrate ή aluminum hydroxide ATH).

Κατά τη συλλογή των παραπάνω συνθετικών μονωτήρων δημιουργήθηκε λεπτομερές αρχείο για τον κάθε μονωτήρα, με όλες τις σημαντικές και απαραίτητες πληροφορίες, για την καλύτερη οργάνωσή τους. Η καρτέλα, που χρησιμοποιήθηκε, περιλάμβανε, κάθε φορά, όσο περισσότερα στοιχεία ήταν διαθέσιμα για τον κάθε μονωτήρα και φαίνεται στο σχήμα 3-1.

ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ			
Κωδική Ονομασία	Αριθμός σύμβασης	Θέση αρχειοθέτησης της σύμβασης	Κατασκευαστής
Χώρα κατασκευής		Μήνας / Έτος κατασκευής	Τύπος μονωτήρα/ Τάση λειτουργίας (kV)
Δοκιμές αποδοχής		Ναι <input type="checkbox"/>	Όχι <input type="checkbox"/>
Ηλεκτρονικό αρχείο του μονωτήρα	Όνομα φωτογραφίας (κοντινή - ολόκληρου του μονωτήρα)		
Ημερομηνία συλλογής			
ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ			
Υλικά κατασκευής			
Περιβλήμα		Ράβδος	Μεταλλικοί ακροδέκτες
Συνολικό μήκος (mm)	Μήκος ερπυσμού (mm)	Διάμετρος κωθίων (mm) D1/D2	Αριθμός κωθίων N1/N2
Κατασκευαστικό σχέδιο			
*ΜΟΝΟ ΓΙΑ ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΜΕΝΟΥΣ			
Όνομασία γραμμής μεταφοράς	Τοποθεσία		Τάση λειτουργίας γραμμής μεταφοράς (kV)
Ρύπανση (ποιοτικά - ανάλογα την περιοχή)(βιομηχανική, αγροτική, παραθαλάσσια, εργοτάξιο, μέσα στην πόλη κλπ)			Έτος εγκατάστασης στο δίκτυο
Όνομα φωτογραφίας με το μονωτήρα στη γραμμή			Όνομα φωτογραφίας κατά την αποξήλωση του μονωτήρα

Σχήμα 3-1. Καρτέλα που συμπληρώθηκε, για κάθε μονωτήρα, πριν την έναρξη των μετρήσεων.

Για να μη γίνεται διαφήμιση ή δυσφήμιση κάποιου από τους κατασκευαστές των συνθετικών μονωτήρων που συλλέχθηκαν, αλλά και για την καλύτερη οργάνωση τους, υιοθετήθηκε μια «Κωδική Ονομασία». Η κωδική ονομασία περιλάμβανε τον κατασκευαστή σύμφωνα με τον πίνακα 3-1, τον τύπο των συνθετικών μονωτήρων σύμφωνα με τον πίνακα 3-2 και έναν αύξοντα αριθμό, ο οποίος δηλώνει τον αριθμό του μονωτήρα μεταξύ όμοιων μονωτήρων. Επίσης, στους μεταχειρισμένους μονωτήρες τοποθετήθηκε στην αρχή της κωδικής ονομασίας ο αγγλικός χαρακτήρας «U» από την αγγλική λέξη «used».

Πίνακας 3-1. Κωδική ονομασία για τους κατασκευαστές των συνθετικών μονωτήρων.

Κατασκευαστές συνθετικών μονωτήρων	
A	Κατασκευαστής A
B	Κατασκευαστής B
C	Κατασκευαστής C
D	Κατασκευαστής D
E	Κατασκευαστής E
F	Κατασκευαστής F

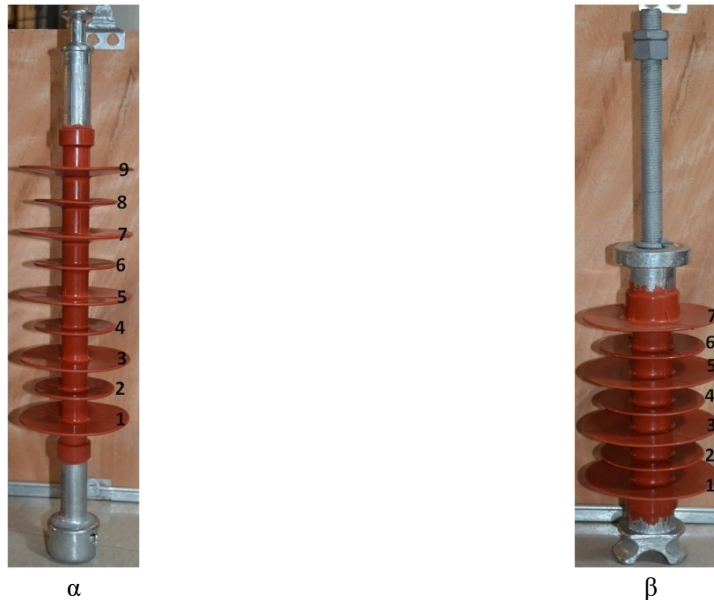
Πίνακας 3-2. Κωδική ονομασία για τους τύπους των συνθετικών μονωτήρων.

Τύποι συνθετικών μονωτήρων	
1	Συνθετικός μονωτήρας στήριξης
2	Συνθετικός μονωτήρας ανάρτησης

Για παράδειγμα ο συνθετικός μονωτήρας με την κωδική ονομασία **A214** είναι: καινούριος συνθετικός μονωτήρας από τον κατασκευαστή A, τύπου ανάρτησης και με αύξοντα αριθμό μεταξύ όμοιων μονωτήρων 14, ενώ ο **UB15** είναι μεταχειρισμένος συνθετικός μονωτήρας από τον κατασκευαστή B, τύπου στήριξης και με αύξοντα αριθμό μεταξύ όμοιων μονωτήρων 5.

Επίσης, για την καλύτερη οργάνωση των δοκιμών (των μονωτήρων) κατά την εκτέλεση των δοκιμών υιοθετήθηκε και ένα σύστημα αρίθμησης των κυαθίων των μονωτήρων. Από εδώ και στο εξής, όταν γίνεται αναφορά στα κυάθια μονωτήρων, θα προστίθεται άλλος ένας αριθμός (από το 1 μέχρι όσα είναι τα κυάθια του καθενός μονωτήρα) μετά την κωδική ονομασία του μονωτήρα. Ο αριθμός αυτός θα συμβολίζει τον αύξοντα αριθμό του κυαθίου στο οποίο αναφερόμαστε. Στους μονωτήρες στήριξης η αρίθμηση των κυαθίων ξεκινάει από την πλευρά που «ακουμπά» στον μονωτήρα (κατά την τοποθέτηση του στο δίκτυο) ο αγωγός μέσης τάσης και στους μονωτήρες ανάρτησης η αρίθμηση των κυαθίων ξεκινάει

από την πλευρά που ο μονωτήρας (κατά την τοποθέτηση του στο δίκτυο) κρέμεται από το στύλο. Στο σχήμα 3-2 φαίνεται ο τρόπος αρίθμησης των κυαθίων σε έναν καινούριο μονωτήρα στήριξης και έναν καινούριο ανάρτησης του κατασκευαστή Α. Η αρίθμηση των κυαθίων των υπολοίπων μονωτήρων έγινε με αντίστοιχο τρόπο.



Σχήμα 3-2. Τρόπος αρίθμησης των κυαθίων στους (α) καινούριος μονωτήρας ανάρτησης του κατασκευαστή Α, (β) καινούριος μονωτήρας στήριξης του κατασκευαστή Α.

Στον πίνακα 3-3 φαίνονται οι συνολικοί αριθμοί μονωτήρων που κατέστη δυνατό να συγκεντρωθούν. Επιπλέον, στον πίνακα 3-4 φαίνεται το έτος κατασκευής του καθενός από τους καινούριους μονωτήρες και στους πίνακες 3-5 και 3-6 παρατίθενται ορισμένες χρήσιμες πληροφορίες για τους μεταχειρισμένους μονωτήρες στήριξης και ανάρτησης αντίστοιχα. Οι πληροφορίες αυτές περιλαμβάνουν για τον κάθε μονωτήρα: τις χρονολογίες κατασκευής, εγκατάστασης στο δίκτυο και αποξήλωσης από το δίκτυο, τα χρόνια λειτουργίας και την τοποθεσία που ήταν εγκατεστημένοι οι μονωτήρες πριν την αποξήλωση τους.

Πίνακας 3-3. Συνολικός αριθμός μονωτήρων που συγκεντρώθηκαν ανά τύπο και κατασκευαστή.

Κωδική ονομασία		Πλήθος
A	1	39
	2	40
UA	1	6
	2	2
B	1	3
	2	1
UB	1	8
	2	8
C	1	9
	2	7
UC	1	-
	2	-
D	1	20
	2	20
UD	1	-
	2	-
E	1	2
	2	-
UE	1	9
	2	-
F	1	2
	2	-
UF	1	-
	2	-
Σύνολο		176

Πίνακας 3-4. Έτος κατασκευής καθενός από τους καινούριους μονωτήρες.

Κωδική ονομασία	Έτος κατασκευής
A11-A13, A124	2017
A14-A123, A125-A139	2018
A21 -A240	2018
B11, B12	2017
B13	2016
B21	2016
C11-C19	2016
C21-C27	2016
D11-D120	2020
D21-D220	2020
E11, E12	2019
F11, F12	Άγνωστο

Πίνακας 3-5. Χρήσιμες πληροφορίες για τους μεταχειρισμένους συνθετικούς μονωτήρες στήριξης (όπου: MT = Μέση Τάση και ΚΔΕΠ = Κέντρο Δοκιμών Ερευνών και Προτύπων).

Μεταχειρισμένοι συνθετικοί μονωτήρες στήριξης					
Κωδική ονομασία	Έτος κατασκευής	Έτος εγκατάστασης	Έτος αποξήλωσης	Χρόνια στο δίκτυο	Τοποθεσία στο δίκτυο κατά τη λειτουργία
UA11	2018	2018	2020	2	Εύβοια (Κατσαρόνι) - Γραμμή MT
UA12	2018	2018	2020	2	Εύβοια (Κατσαρόνι) - Γραμμή MT
UA13	2018	2018	2020	2	Εύβοια (Κατσαρόνι) - Γραμμή MT
UA14	2018	2018	2020	2	Εύβοια (Κατσαρόνι) - Γραμμή MT
UA15	2018	2018	2020	2	Εύβοια (Κατσαρόνι) - Γραμμή MT
UA16	2018	2018	2020	2	Εύβοια (Κατσαρόνι) - Γραμμή MT
UB11	-	2010	2020	10	Εύβοια - (Οδός Ρήγου και Κημαίων, Χαλκίδα) - Μετασχηματιστής (Μ/Σ) διανομής 136 (2000)
UB12	-	2010	2020	10	Εύβοια - (Οδός Ρήγου και Κημαίων, Χαλκίδα) - Μ/Σ διανομής 136 (2000)
UB13	-	2010	2020	10	Εύβοια - (Οδός Ρήγου και Κημαίων, Χαλκίδα) - Μ/Σ διανομής 136 (2000)
UB14	2008	2010	2020	10	Εύβοια (Κατσαρόνι) - Γραμμή MT
UB15	2008	2010	2020	10	Εύβοια (Κατσαρόνι) - Γραμμή MT
UB16	2008	2010	2020	10	Εύβοια (Κατσαρόνι) - Γραμμή MT
UB17	2016	2016	2020	4	Αθήνα - Κέντρο δοκιμών, ερευνών και προτύπων (ΚΔΕΠ) - μη ενεργός μονωτήρας σε εξωτερικό χώρο
UB18	2016	2016	2020	4	Αθήνα - ΚΔΕΠ - μη ενεργός μονωτήρας σε εξωτερικό χώρο
UE11	2016	2017	2020	3	Αθήνα - ΚΔΕΠ - μη ενεργός μονωτήρας σε εξωτερικό χώρο (από τριπολικό αποζεύκτη μέσης τάσης)
UE12	2016	2017	2020	3	Αθήνα - ΚΔΕΠ - μη ενεργός μονωτήρας σε εξωτερικό χώρο (από τριπολικό αποζεύκτη μέσης τάσης)
UE13	2016	2017	2020	3	Αθήνα - ΚΔΕΠ - μη ενεργός μονωτήρας σε εξωτερικό χώρο (από τριπολικό αποζεύκτη μέσης τάσης)
UE14	2016	2017	2020	3	Αθήνα - ΚΔΕΠ - μη ενεργός μονωτήρας σε εξωτερικό χώρο (από τριπολικό αποζεύκτη μέσης τάσης)
UE15	2016	2017	2020	3	Αθήνα - ΚΔΕΠ - μη ενεργός μονωτήρας σε εξωτερικό χώρο (από τριπολικό αποζεύκτη μέσης τάσης)
UE16	2016	2017	2020	3	Αθήνα - ΚΔΕΠ - μη ενεργός μονωτήρας σε εξωτερικό χώρο (από τριπολικό αποζεύκτη μέσης τάσης)
UE17	2016	2017	2020	3	Αθήνα - ΚΔΕΠ - μη ενεργός μονωτήρας σε εξωτερικό χώρο (από τριπολικό αποζεύκτη μέσης τάσης)
UE18	2016	2017	2020	3	Αθήνα - ΚΔΕΠ - μη ενεργός μονωτήρας σε εξωτερικό χώρο (από τριπολικό αποζεύκτη μέσης τάσης)
UE19	2016	2017	2020	3	Αθήνα - ΚΔΕΠ - μη ενεργός μονωτήρας σε εξωτερικό χώρο (από τριπολικό αποζεύκτη μέσης τάσης)

Πίνακας 3-6. Χρήσιμες πληροφορίες για τους μεταχειρισμένους συνθετικούς μονωτήρες ανάρτησης (όπου MT = Μέση Τάση).

Μεταχειρισμένοι συνθετικοί μονωτήρες ανάρτησης					
Κωδική ονομασία	Έτος κατασκευής	Έτος εγκατάστασης	Έτος αποξήλωσης	Χρόνια στο δίκτυο	Τοποθεσία στο δίκτυο κατά τη λειτουργία
UA21	2018	2018	2020	2	Εύβοια (Κατσαρόνι) - Γραμμή MT
UA22	2018	2018	2020	2	Εύβοια (Κατσαρόνι) - Γραμμή MT
UB21	2008	2010	2020	10	Εύβοια (Αλιβέρι) - Γραμμή MT
UB22	2008	2010	2020	10	Εύβοια (Αλιβέρι) - Γραμμή MT
UB23	2008	2010	2020	10	Εύβοια (Αλιβέρι) - Γραμμή MT
UB24	2008	2010	2020	10	Εύβοια (Αλιβέρι) - Γραμμή MT
UB25	2008	2010	2020	10	Εύβοια (Αλιβέρι) - Γραμμή MT
UB26	2008	2010	2020	10	Εύβοια (Αλιβέρι) - Γραμμή MT
UB27	2015	2015	2020	5	Εύβοια (Κατσαρόνι) - Γραμμή MT
UB28	2010	2010	2020	10	Εύβοια (Κατσαρόνι) - Γραμμή MT

Στους πίνακες 3-5 και 3-6 χρησιμοποιείται χρώμα το οποίο προσδιορίζει ομάδες μεταχειρισμένων μονωτήρων, οι οποίοι έχουν ίδιο έτος εγκατάστασης, ίδιο έτος αποξήλωσης από το δίκτυο (άρα και ίδια διάρκεια εγκατάστασης στο δίκτυο) και ίδια τοποθεσία αποξήλωσης. Αυτές οι ομάδες θεωρείται ότι έχουν ίδια χαρακτηριστικά γήρανσης και άρα θα δοκιμαστεί ένας από τους μονωτήρες της κάθε χρωματικής ομάδας σε κάθε δοκιμή. Το αποτέλεσμα θεωρείται ότι θα χαρακτηρίζει όλους του μονωτήρες που ανήκουν στην ίδια χρωματική ομάδα. Σημειώνεται εδώ ότι για τις ομάδες μονωτήρων που υπήρχε μόνο ένα τεμάχιο, έγινε προσπάθεια να πραγματοποιηθούν όσο το δυνατό περισσότερες δοκιμές. Κάποιες δοκιμές παραλήφθηκαν για αυτούς τους μονωτήρες λόγω έλλειψης δοκιμίων.

3.2 Πρόγραμμα δοκιμών

Για τους σκοπούς της διδακτορικής διατριβής ορίστηκε και πραγματοποιήθηκε ένα εκτενές πρόγραμμα δοκιμών στους συνθετικούς μονωτήρες που συλλέχθηκαν, με σκοπό την εξαγωγή σημαντικών συμπερασμάτων σχετικά με την ποιότητα των συνθετικών μονωτήρων που χρησιμοποιούνται στο ελληνικό ηλεκτρικό δίκτυο, αλλά και τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας των δοκιμών, όπου αυτό είναι δυνατόν. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν φαίνονται στον πίνακα 3-7. Η κάθε δοκιμή έχει μελετηθεί και αναλυθεί βιβλιογραφικά στο κεφάλαιο 2 της παρούσης διδακτορικής διατριβής.

Πίνακας 3-7. Πρόγραμμα δοκιμών στους συνθετικούς μονωτήρες και αντίστοιχα πρότυπα.

	Αύξων αριθμός	Δοκιμή	Πρότυπο
Μονωτικό περιβλήμα	1	Οπτική επιθεώρηση	Δεν υπάρχει πρότυπο.
	2	Υδροφοβικότητα	IEC TS 62073 [38]
	3	Σκληρότητα Shore A	ISO 48-4 [59]
	4	Πυκνότητα	ISO 2781 [75]
	5	Κεκλιμένο επίπεδο (Inclined plane test)	IEC 60587 [84]
	6	Εφελκυσμός και μέγιστη επιμήκυνση (Tensile strength and maximum elongation)	ISO 37 [93]
	7	Αντοχή σε σκίσιμο (Tear strength test)	ISO 34-1 [104]
	8	Φασματοσκοπία υπέρυθρων μετασχηματισμού Fourier (Fourier transform infrared spectroscopy – FTIR)	Δεν υπάρχει πρότυπο. Βοηθητικός οδηγός: Cigre Technical Brochure 595 [113]
	9	Θερμοβαρυμετρική ανάλυση (Thermogravimetric analysis – TGA)	ISO 11358-1 [121] Βοηθητικός οδηγός: Cigre Technical Brochure 595 [113]
	10	Αντίσταση σε εκκενώσεις υπό υψηλή τάση και χαμηλό ρεύμα (Resistance test to high-voltage, low-current arc discharges)	IEC 61621 [131]
	11	Αντίσταση του μονωτικού περιβλήματος σε οξεία	Δεν υπάρχει πρότυπο.
Ράβδος	12	Δοκιμή διάχυσης νερού (Water diffusion test)	IEC 62217 [151]
	13	Δοκιμή διείσδυσης βαφής (Dye penetration test)	IEC 62217 [151]
	14	Δοκιμή ελέγχου της διαπαφής μεταξύ ράβδου και μονωτικού περιβλήματος (Adhesion Test)	Δεν υπάρχει πρότυπο.
Μηχανική αντοχή	15	Δοκιμή εφελκυσμού για μονωτήρες ανάρτησης	IEC 61109 [183]
	16	Δοκιμή κάμψης για μονωτήρες στήριξης	IEC 61952 [193]

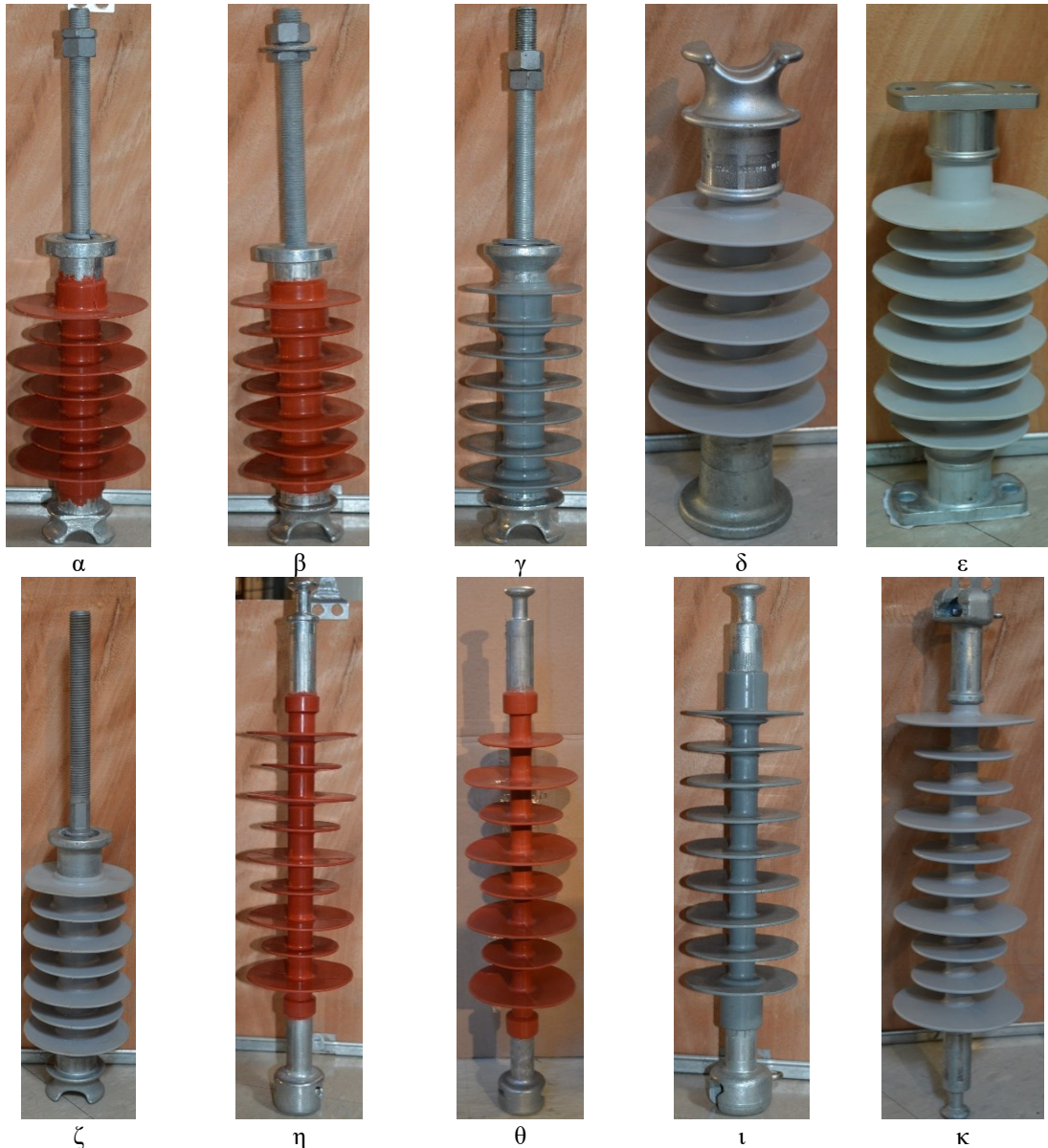
Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η διάταξη που χρησιμοποιείται για την κάθε δοκιμή, ο τρόπος εκτέλεσης της, τα αποτελέσματα της, τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα, καθώς επίσης και τα μοντέλα προσομοιώσεων και τα νευρωνικά δίκτυα που χρησιμοποιήθηκαν σε ορισμένες από αυτές τις δοκιμές.

3.3 Οπτική επιθεώρηση συνθετικών μονωτήρων

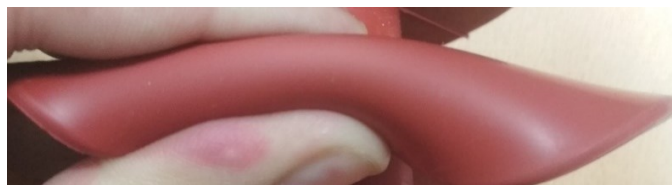
Όλοι οι καινούριοι συνθετικοί μονωτήρες ανάρτησης και στήριξης επιθεωρήθηκαν οπτικά. Κατά την οπτική επιθεώρηση τους δε βρέθηκαν σημάδια φθοράς και διάβρωσης, δεν υπήρχαν τρύπες και ασυνέχειες στο μονωτικό περίβλημα, το οποίο είχε ομοιόμορφη εμφάνιση σε όλο το μήκος των μονωτήρων και οι μεταλλικοί ακροδέκτες είχαν πολύ καλή

εμφάνιση. Επίσης, κατά τον οπτικό έλεγχο, ελέγχθηκε με το χέρι (πιέζοντας το μονωτικό περίβλημα με κατεύθυνση αντίθετη από τους μεταλλικούς ακροδέκτες) και βρέθηκε πολύ καλή η σύνδεση μεταξύ των μεταλλικών ακροδεκτών και του μονωτικού περιβλήματος των μονωτήρων (σιλικονούχο καουτσούκ – silicone rubber). Τέλος, δοκιμάσθηκε σε κάθε μονωτήρα το λύγισμα των κυαθίων του, ώστε να διαπιστωθεί αν το σιλικονούχο καουτσούκ στο σημείο που λύγιζε θα εμφάνιζε ρυτίδιασμα ή / και ρωγμές. Σε όλους τους μονωτήρες κατά το λύγισμα αυτό των κυαθίων τους δεν εμφανίστηκαν ρωγμές. Επιπλέον, λήφθηκαν φωτογραφίες για τον κάθε μονωτήρα. Αυτά τα αποτελέσματα ίσχυαν για όλους τους καινούριους συνθετικούς μονωτήρες όλων των κατασκευαστών.

Στο σχήμα 3-3 παρουσιάζονται οι φωτογραφίες των καινούριων συνθετικών μονωτήρων στήριξης και ανάρτησης (ένα τεμάχιο από την κάθε παρτίδα) όλων των κατασκευαστών που λήφθηκαν κατά την οπτική επιθεώρηση. Στο σχήμα 3-4 φαίνεται η δοκιμή κάμψης (λύγισης) των κυαθίων ενός μονωτήρα του κατασκευαστή Α (ενδεικτικά) κατά τον οπτικό έλεγχο. Καμιά ρωγμή ή / και ρυτίδιασμα δεν παρατηρήθηκε στα κυάθια κανενός από τους καινούριους μονωτήρες, γεγονός που υποδηλώνει ότι το μονωτικό τους περίβλημα είναι σε καλή κατάσταση.



Σχήμα 3-3. Καινούριοι συνθετικοί μονωτήρες στήριξης των κατασκευαστών: (α) A, (β) B, (γ) C, (δ) D, (ε) E, (ζ) F και ανάρτησης των κατασκευαστών: (η) A, (θ) B, (ι) C, (κ) D.



Σχήμα 3-4. Δοκιμή κάμψης των κυαθίων των συνθετικών μονωτήρων του κατασκευαστή A. Δεν παρατηρούνται ρωγμές ή / και ρυτίδιασμα. Όμοια αποτελέσματα για όλους τους καινούριους μονωτήρες.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε οπτική επιθεώρηση στους μεταχειρισμένους μονωτήρες που συλλέχθηκαν από τα δίκτυα του ΔΕΔΔΗΕ. Μία γενική παρατήρηση είναι ότι όσο περισσότερα χρόνια λειτουργούσε ένας μονωτήρας στο δίκτυο, τόσο χειρότερη ήταν η κατάσταση του κατά την οπτική επιθεώρηση. Πιο αναλυτικά, οι μονωτήρες UA11-UA16

που ήταν 2 χρόνια εγκατεστημένοι στο δίκτυο, βρέθηκαν σε αρκετά καλή κατάσταση, εκτός από το ότι όλοι τους είχαν στραβωμένη τη μεταλλική ράβδο του κάτω ακροδέκτη (σχήμα 3-5 (α)) και το μονωτικό τους περίβλημα είχε αρκετή λάσπη (σχήμα 3-5(β)). Η στραβή μεταλλική ράβδος δε συνιστά ανησυχητικό στοιχείο για τη λειτουργία των μονωτήρων και πιθανόν να έγινε κατά την εγκατάστασή τους. Η λάσπη πιθανόν επικάθισε επάνω στους μονωτήρες μετά την αποξήλωση τους από το δίκτυο, καθώς είναι πιθανόν να είχαν τοποθετηθεί στο χώμα μέχρι να τους περιυλλέξουμε για τους σκοπούς αυτής της διατριβής. Το μονωτικό περίβλημα των μονωτήρων UB11-UB13, με 10 χρόνια λειτουργίας στο δίκτυο, ήταν σε κακή κατάσταση (χωρίς όμως να επηρεάζει τη λειτουργία τους), καθώς επίσης και οι μεταλλικοί ακροδέκτες τους (και κυρίως η μεταλλική ράβδος στον κάτω ακροδέκτη) ήταν αρκετά οξειδωμένοι και σκουριασμένοι (σχήμα 3-5 (γ)). Σχετικά με τους μονωτήρες UB14-UB16, με 10 χρόνια λειτουργίας στο δίκτυο, παρατηρήθηκε ότι τα κυάθια τους είχαν αρκετή ρύπανση και στον UB15 βρέθηκε σκισμένο το κάτω κυάθιο (σχήμα 3-5 (δ)), πιθανόν λόγω χειρισμών των τεχνικών κατά την αποξήλωση του, καθώς και διάφορες σχισμές κατά μήκος του μονωτικού του περιβλήματος πιθανόν και αυτές λόγω κακής μεταχείρισης του έπειτα από την αποξήλωση (σχήμα 3-5 (ζ)). Οι μονωτήρες UB17-UB18, με 4 χρόνια σε εξωτερικό χώρο (όχι στο δίκτυο), ήταν σε καλή κατάσταση, αν και λίγο ρυπασμένοι. Οι UE11-UE19, με 3 χρόνια σε εξωτερικό χώρο (όχι στο δίκτυο), ήταν και αυτοί σε καλή κατάσταση με σημάδια λασποβροχής επάνω τους. Οι UA21-UA22, με 2 χρόνια λειτουργίας στο δίκτυο, βρέθηκαν σε πολύ καλή κατάσταση, σαν καινούριοι. Οι UB21-UB26, με 10 χρόνια στο δίκτυο, ήταν αρκετά ταλαιπωρημένοι. Το μονωτικό τους περίβλημα ήταν αρκετά ρυπασμένο και φαινόταν σαν να είναι ξεραμένο, καθώς σε πολλά σημεία τα κυάθια ήταν μονίμως τσακισμένα (σχήμα 3-5 (ε)). Ο UB27, με 5 χρόνια λειτουργίας στο δίκτυο, ήταν σε πολύ καλή κατάσταση, το ίδιο και ο UB28, παρόλο που ήταν σε λειτουργία για 10 χρόνια στο δίκτυο.

Έπειτα από την οπτική επιθεώρηση, πραγματοποιήθηκε η δοκιμή κάμψης (λύγισης) (σχήμα 3-4) στα κυάθια των μεταχειρισμένων συνθετικών μονωτήρων, ώστε με αυτόν τον τρόπο να γίνει μία πρώτη εκτίμηση της κατάστασης και της ελαστικότητας του μονωτικού τους περιβλήματος. Επίσης, ελέγχθηκε με το χέρι (πιέζοντας το μονωτικό περίβλημα με κατεύθυνση αντίθετη από τους μεταλλικούς ακροδέκτες) η σύνδεση μεταξύ των μεταλλικών ακροδεκτών και του μονωτικού περιβλήματος των μονωτήρων (σιλικονούχο

καουτσούκ – silicone rubber). Τα αποτελέσματα των δύο αυτών ελέγχων παρουσιάζονται στον πίνακα 3-8.



Σχήμα 3-5. Οπτική επιθεώρηση σε μεταχειρισμένους μονωτήρες: (α) UA16, (β) UA13, (γ) UB11, (δ) UB15, (ε) UB25, (ζ) UB15.

Από τα αποτελέσματα του πίνακα 3-8 φαίνεται ότι η σύνδεση μεταξύ του μονωτικού περιβλήματος και των μεταλλικών ακροδεκτών των μονωτήρων ήταν πολύ καλή, παρά την ηλικία των μεταχειρισμένων μονωτήρων. Επίσης, όσον αφορά τη δοκιμή της κάμψης (λύγισης) των κυαθίων των μονωτήρων παρατηρούμε ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των ρωγμών που σχηματίζονται και της ηλικίας των μονωτήρων. Πιο συγκεκριμένα, οι μονωτήρες UA11-UA16, οι UB17-UB18, οι UE11-UE19, οι UA21-UA22 και ο UB27 με 2, 4, 3, 2 και 5 χρόνια καταπόνησης σε εξωτερική χρήση αντίστοιχα, δεν εμφάνιζαν ρωγμές και σκισίματα κατά την κάμψη (λύγιση) των κυαθίων τους. Από την άλλη μεριά, οι UB11-UB16, ο UB21 και ο UB26 με 10 χρόνια στο δίκτυο έκαστος, εμφάνισαν, είτε κάποιες ρωγμές, είτε δυσκολία κατά τη λύγιση των κυαθίων τους, είτε, στην χειρότερη των περιπτώσεων, τα κυάθια τους κατά τη λύγιση σκίστηκαν. Στο σχήμα 3-6 (α) παρουσιάζονται ενδεικτικά οι ρωγμές που παρατηρήθηκαν σε κυάθιο του UB12 κατά τη λύγιση του και στο (β) ένα σκισμένο κυάθιο του UB14 κατά τη λύγιση, για την καλύτερη κατανόηση των παρατηρήσεων του πίνακα 3-8.

Πίνακας 3-8. Αποτελέσματα δοκιμής σωστής σύνδεσης μονωτικού περιβλήματος (μ.π.) με τους μεταλλικούς ακροδέκτες (μ.α.) και δοκιμής κάμψης (λύγισης) των κυαθίων.

Μονωτήρας	Σύνδεση μ.π. - μ.α.	Ρωγμές κατά την κάμψη	Μονωτήρας	Σύνδεση μ.π. - μ.α.	Ρωγμές κατά την κάμψη
UA11	Καλή	Όχι	UE14	Καλή	Όχι
UA12	Καλή	Όχι	UE15	Καλή	Όχι
UA13	Καλή	Όχι	UE16	Καλή	Όχι
UA14	Καλή	Όχι	UE17	Καλή	Όχι
UA15	Καλή	Όχι	UE18	Καλή	Όχι
UA16	Καλή	Όχι	UE19	Καλή	Όχι
UB11	Καλή	Μικρές ρωγμές	UA21	Καλή	Όχι
UB12	Καλή	Ναι	UA22	Καλή	Όχι
UB13	Καλή	Μικρές ρωγμές - δύσκολη κάμψη των κυαθίων	UB21	Καλή	Όχι ρωγμές, αλλά ένα κυάθιο σκίστηκε
UB14	Καλή	Ναι (σκίστηκαν όλα τα κυάθια)	UB22	Καλή	Όχι
UB15	Καλή	Ναι (σκίστηκαν όλα τα κυάθια)	UB23	Καλή	Όχι
UB16	Καλή	Ναι	UB24	Καλή	Όχι
UB17	Καλή	Όχι	UB25	Καλή	Όχι
UB18	Καλή	Όχι	UB26	Καλή	Όχι ρωγμές, αλλά ένα κυάθιο σκίστηκε
UE11	Καλή	Όχι	UB27	Καλή	Όχι
UE12	Καλή	Όχι	UB28	Καλή	Όχι
UE13	Καλή	Όχι			



α



β

Σχήμα 3-6. Ενδεικτικά παραδείγματα (α) ρωγμών στον UB12 και (β) ολοκληρωτικού σκισίματος κυαθίου στον UB14, για την καλύτερη κατανόηση του πίνακα 3-8.

Τέλος, παρατηρώντας τον πίνακα 3-8, εντύπωση προκαλεί το γεγονός ότι οι UB22 – UB25 και ο UB28, με 10 χρόνια λειτουργίας στο δίκτυο, δεν εμφάνισαν καθόλου ρωγμές κατά την κάμψη – λύγιση των κυαθίων τους. Το παραπάνω πιθανόν να δηλώνει, είτε πολύ καλό υλικό κατασκευής, είτε ότι τα σημεία των γραμμών που αφαιρέθηκαν αυτοί οι μονωτήρες

δεν ήταν τόσο εκτεθειμένα σε περιβαλλοντικές καταπονήσεις (όπως ηλιακή ακτινοβολία ή καιρικά φαινόμενα).

3.4 Διερεύνηση της ποιότητας των υλικών των συνθετικών μονωτήρων

Η ενότητα 3.4 του συγκεκριμένου διδακτορικού περιλαμβάνει όλες τις δοκιμές, τα αποτελέσματα τους και τα συμπεράσματα σχετικά με τα υλικά των συνθετικών μονωτήρων. Συγκεκριμένα στην ενότητα 3.4.1 διερευνάται και μελετάται το μονωτικό περίβλημα (insulating housing) των συνθετικών μονωτήρων, στην 3.4.2 η ράβδος (ή ο πυρήνας) τους (glass fiber reinforced plastic rod – GFRP rod) και στην 3.4.3 γίνεται διερεύνηση για την ποιότητα της σύνδεσης (κόλλησης) μεταξύ του μονωτικού περιβλήματος των μονωτήρων και της ράβδου τους.

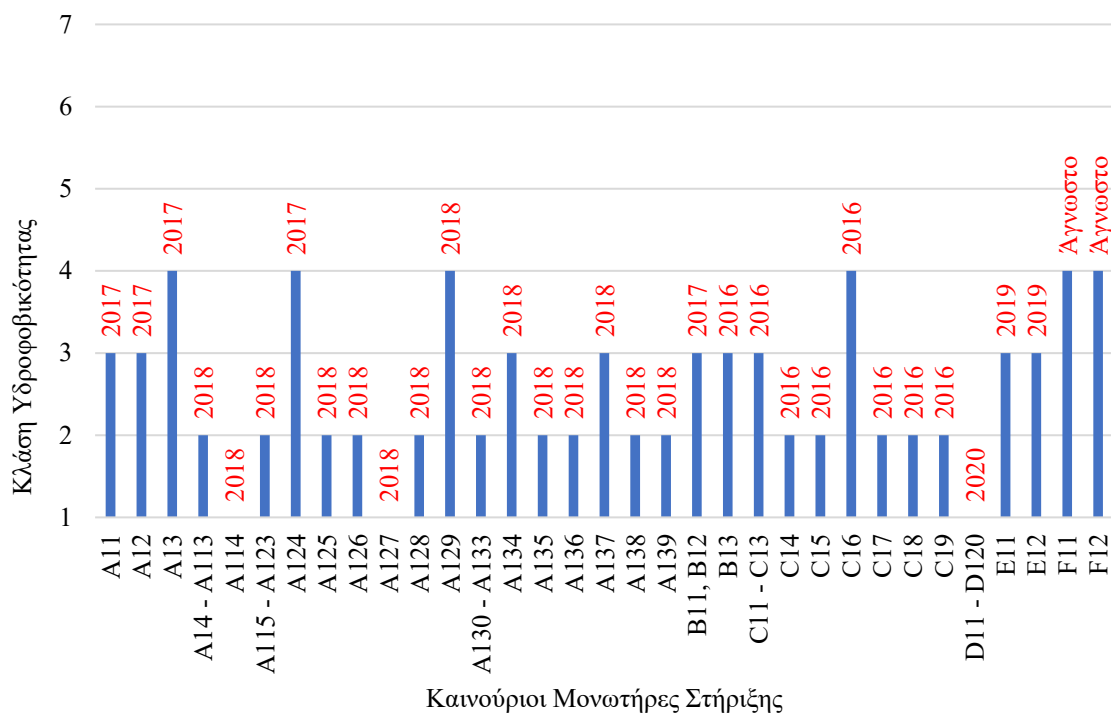
3.4.1 Διερεύνηση του μονωτικού περιβλήματος

Στην ενότητα 3.4.1 της παρούσης διδακτορικής διατριβής παρουσιάζονται οι δοκιμές, ο τρόπος εκτέλεσης τους, τα αποτελέσματα τους και τα συμπεράσματα που προκύπτουν, αναφορικά με το υλικό του μονωτικού περιβλήματος των μονωτήρων. Επίσης, περιγράφονται και αναλύονται τα μοντέλα προσομοίωσης και τα νευρωνικά δίκτυα που αναπτύχθηκαν σε κάποιες από αυτές τις δοκιμές.

3.4.1.1 Δοκιμή υδροφοβικότητας

3.4.1.1.1 Δοκιμή υδροφοβικότητας σε καινούριους και μεταχειρισμένους συνθετικούς μονωτήρες

Η δοκιμή κατάταξης των συνθετικών μονωτήρων σε κλάσεις υδροφοβικότητας πραγματοποιήθηκε, όπως περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 2.2.1.1 της παρούσης διδακτορικής διατριβής, σύμφωνα με τη μέθοδο ψεκασμού της τεχνικής προδιαγραφής IEC TS 62073 [38]. Η κατηγοριοποίηση σε κλάσεις υδροφοβικότητας πραγματοποιήθηκε σε όλους τους καινούριους και τους μεταχειρισμένους συνθετικούς μονωτήρες. Στο σχήμα 3-7 φαίνονται οι κλάσεις υδροφοβικότητας των καινούριων συνθετικών μονωτήρων στήριξης, ενώ στο σχήμα 3-8 οι κλάσεις υδροφοβικότητας των μονωτήρων ανάρτησης.

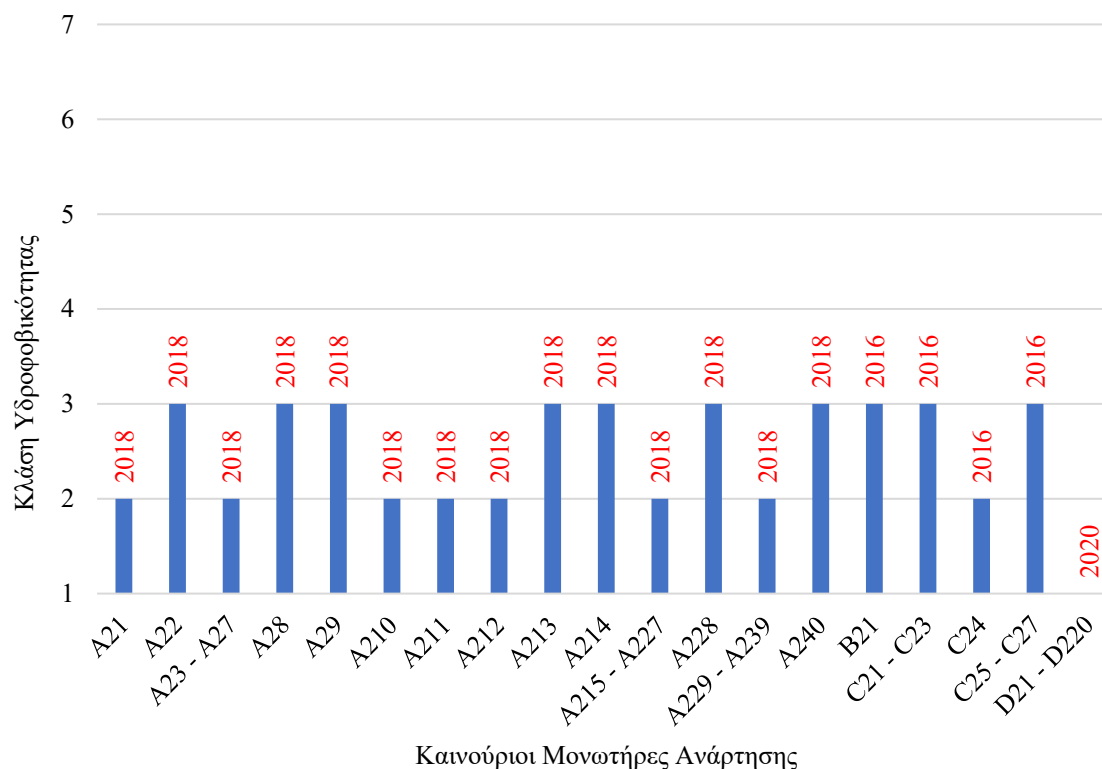


Σχήμα 3-7. Κατάταξη σε κλάσεις υδροφοβικότητας των καινούριων μονωτήρων στήριξης. Με κόκκινο χρώμα είναι το έτος κατασκευής των μονωτήρων.

Αντίθετα με ό,τι θα περίμενε κανείς, καθώς αναφερόμαστε σε καινούριους μονωτήρες, παρατηρείται στο σχήμα 3-7 ότι οι περισσότεροι μονωτήρες, εκτός από αυτούς του κατασκευαστή D (D11 – D120) και κάποιους του A (A114, A127), δεν ανήκουν στην κλάση υδροφοβικότητας 1. Οι πιο πολλοί ανήκουν στην κλάση 2 και κάποιοι από αυτούς ανήκουν στις κλάσεις 3 και 4.

Αυτό ίσως εξηγείται από το γεγονός ότι κάποιοι από τους μονωτήρες που ανήκουν σε μεγαλύτερη κλάση υδροφοβικότητας είναι κατασκευασμένοι σε παλαιότερη χρονολογία, για παράδειγμα οι A11, A12, A13, A124, B11, B12 είναι του 2017 και οι B13, C11 – C13, C16 είναι του 2016. Αυτή η εξήγηση, όμως, δε μπορεί να γενικευτεί, καθώς υπάρχουν και μονωτήρες, οι οποίοι παρόλο που είχαν κατασκευαστεί σε παλαιότερη χρονολογία, ανήκουν σε μικρή κλάση υδροφοβικότητας, όπως είναι οι C14, C15, C17, C18, C19 που ενώ ήταν κατασκευασμένοι το 2016, ανήκουν στην κλάση 2.

Μια άλλη εξήγηση, που ίσως θα μπορούσε να ισχύει, είναι ότι μπορεί οι μονωτήρες που εμφάνισαν μεγαλύτερη κλάση να είχαν αποθηκευτεί από τον ΔΕΔΔΗΕ σε μέρος όπου δεν πληρούνταν οι απαραίτητες συνθήκες για την αποθήκευση συνθετικών μονωτήρων ή ακόμη και να βρίσκονταν σε εξωτερικό μέρος εκτεθειμένοι στις περιβαλλοντικές συνθήκες, με συνέπεια την υποβάθμιση του υλικού του μονωτικού περιβλήματός τους.

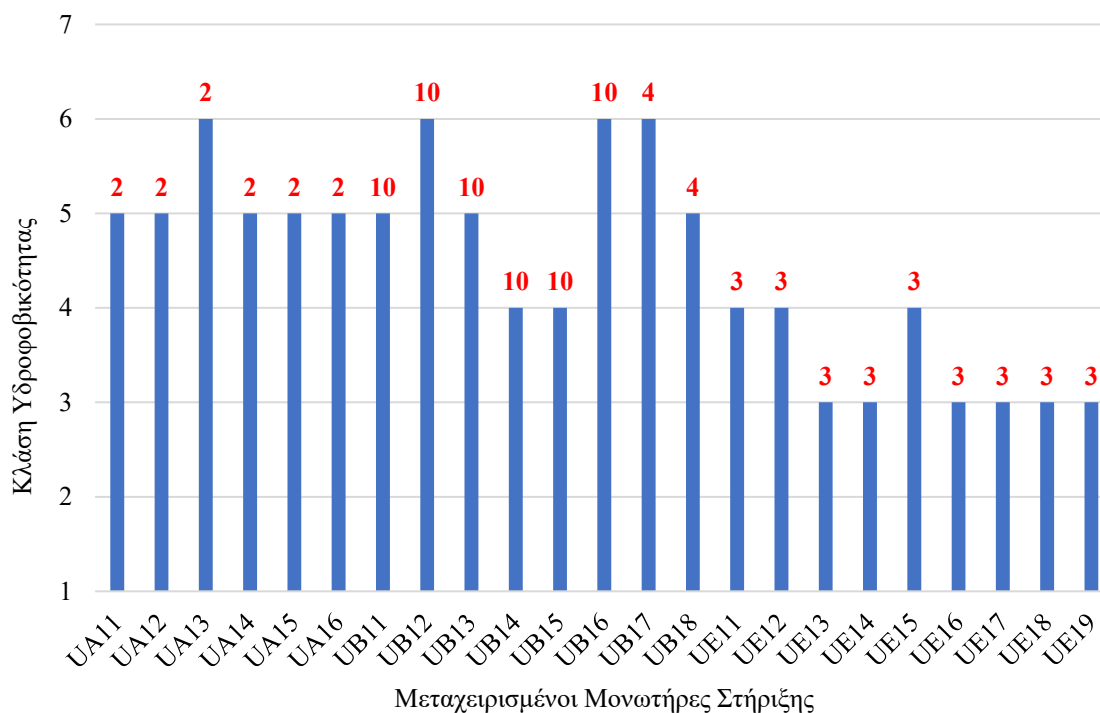


Σχήμα 3-8. Κατάταξη σε κλάσεις υδροφοβικότητας των καινούριων μονωτήρων ανάρτησης. Με κόκκινο χρώμα είναι το έτος κατασκευής των μονωτήρων.

Ακόμη, ίσως η εξήγηση στο παραπάνω να είναι ότι το υλικό του μονωτικού περιβλήματος σε κάποιους μονωτήρες είχε μικρές διαφορές στη σύσταση του, λόγω μη ομοιόμορφης κατανομής του σε όλο το μήκος των μονωτήρων. Έτσι, αφού εκτελέσαμε τις μετρήσεις στο πρώτο κυάθιο του κάθε μονωτήρα, αν το υλικό εκεί δεν ήταν καλό, είχε σαν αποτέλεσμα μια μεγαλύτερη κλάση υδροφοβικότητας.

Τέλος, άλλη μία πιθανή εξήγηση των αποτελεσμάτων του σχήματος 3-7 θα μπορούσε να είναι ο μη αντικειμενικός τρόπος με τον οποίο προκύπτει η κλάση υδροφοβικότητας κάθε δοκιμίου. Ένα αρνητικό της μέτρησης αυτής είναι ότι το αποτέλεσμα (κλάση υδροφοβικότητας) στηρίζεται στην υποκειμενική κρίση του χειριστή που εκτελεί τη μέτρηση και σύμφωνα με την τεχνική προδιαγραφή IEC TS 62073, η αβεβαιότητα της είναι ± 1 κλάση υδροφοβικότητας [38].

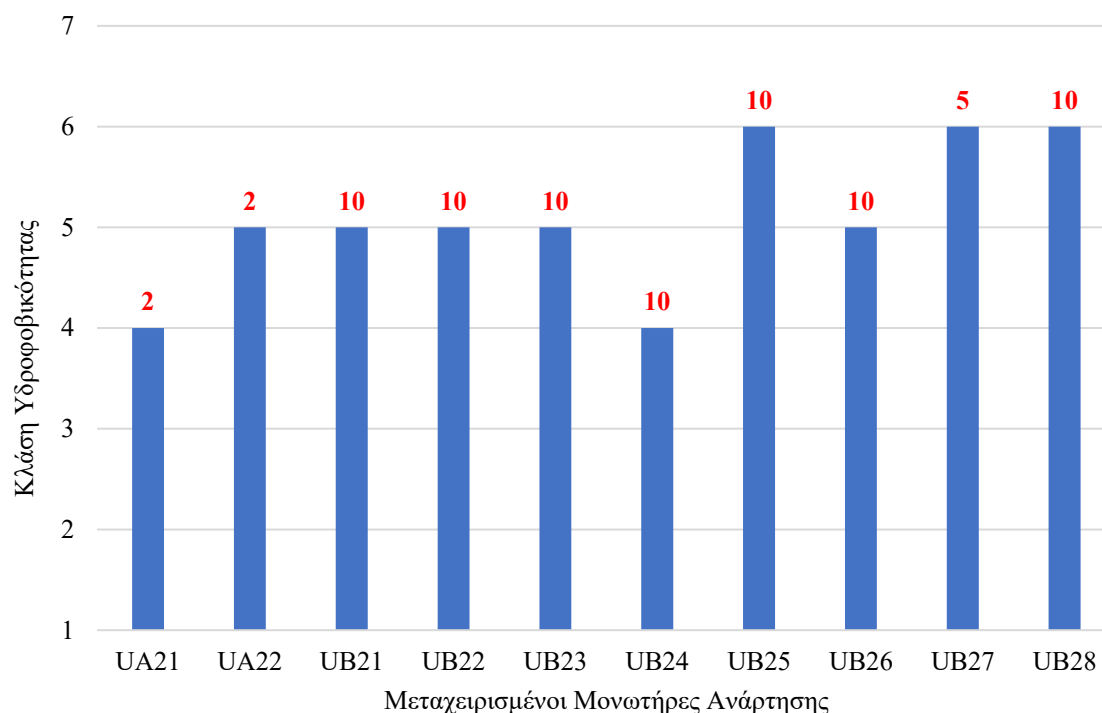
Ομοίως, στο σχήμα 3-8 παρατηρούμε ότι μόνο οι μονωτήρες του κατασκευαστή D (D21 – D220) ανήκουν στην κλάση 1, ενώ οι υπόλοιποι ανήκουν κυρίως στην κλάση 2 και κάποιοι από αυτούς στην κλάση 3. Τα συμπεράσματα είναι όμοια σε αυτήν την περίπτωση με αυτά του σχήματος 3-7.



Σχήμα 3-9. Κατάταξη σε κλάσεις υδροφοβικότητας των μεταχειρισμένων μονωτήρων στήριξης. Με κόκκινο είναι τα χρόνια λειτουργίας του κάθε μονωτήρα.

Στο σχήμα 3-9 φαίνονται τα αποτελέσματα της κατάταξης σε κλάσεις υδροφοβικότητας για τους μεταχειρισμένους μονωτήρες στήριξης. Είναι προφανές ότι η χρήση των μονωτήρων στο ηλεκτρικό δίκτυο έχει επηρεάσει αρνητικά την υδροφοβικότητάς τους σε σχέση με τους αντίστοιχους καινούριους μονωτήρες του σχήματος 3-7. Στο σχήμα 3-9 παρατηρούμε ότι οι μονωτήρες UE11 – UE19 ανήκουν στις κλάσεις 3 και 4 με 3 χρόνια καταπόνηση σε εξωτερικό χώρο, ενώ οι UA11- UA16 ανήκουν στην κλάση 5 και 6 με 2 χρόνια στο δίκτυο. Όπως έχει αναφερθεί ξανά, οι μονωτήρες UE11 – UE19 συλλέχθηκαν από τον εξωτερικό χώρο του ΚΔΕΠ στην Αθήνα, όπου όμως ήταν εκτός λειτουργίας. Συγκρινόμενοι λοιπόν, οι UE11 – UE19 με τους UA11- UA16 βλέπουμε ότι οι πρώτοι έχουν διατηρήσει περισσότερο την υδροφοβικότητά τους. Αυτό ίσως σημαίνει ότι υπό τάση το μονωτικό περίβλημα των συνθετικών μονωτήρων καταπονείται περισσότερο από ότι αν ήταν χωρίς τάση σε εξωτερικό χώρο. Επίσης, οι UB17 και UB18 έχουν αρκετά κακή υδροφοβικότητα (κλάση 6 και 5 αντίστοιχα), παρόλο που και αυτοί ήταν εκτός λειτουργίας για 4 χρόνια στον εξωτερικό χώρο του ΚΔΕΠ. Από την άλλη μεριά, οι UB11 – UB16, με 10 χρόνια λειτουργίας στο δίκτυο, παρουσιάζουν υδροφοβικότητες μεταξύ των κλάσεων 4 – 6. Λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι στην κατάταξη ενός μονωτήρα σε κλάση υδροφοβικότητας παίζει ρόλο ο κατασκευαστής (και άρα το υλικό), τα χρόνια λειτουργίας, αν ήταν ή όχι υπό τάση ο μονωτήρας και η τοποθεσία από όπου

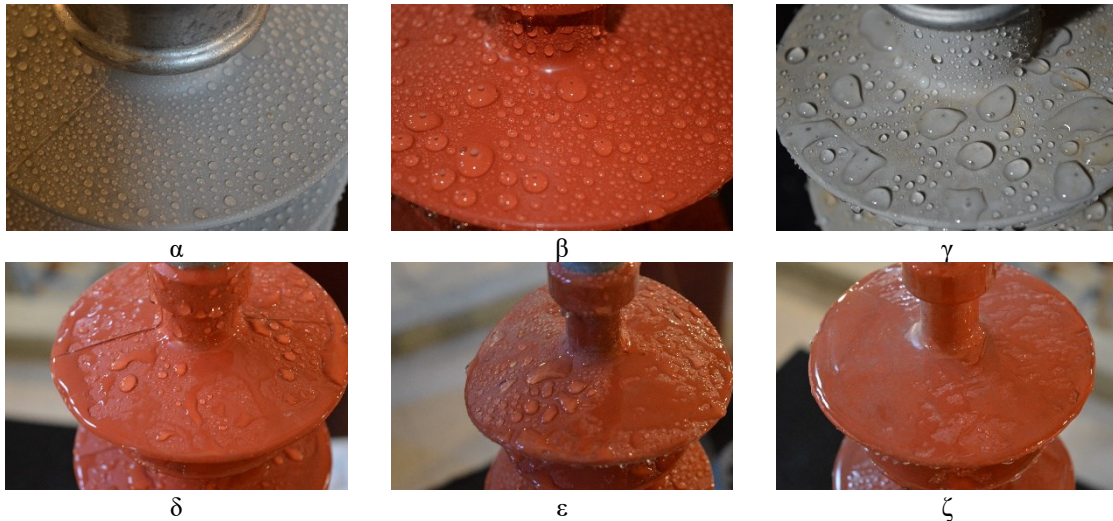
συλλέχθηκε ο μονωτήρας (σε κάθε τοποθεσία επικρατούν άλλες περιβαλλοντικές συνθήκες και άρα είναι διαφορετικός ο βαθμός γήρανσης των μονωτήρων).



Σχήμα 3-10. Κατάταξη σε κλάσεις υδροφοβικότητας των μεταχειρισμένων μονωτήρων ανάρτησης. Με κόκκινο είναι τα χρόνια λειτουργίας του κάθε μονωτήρα.

Στο σχήμα 3-10 φαίνονται τα αποτελέσματα της μέτρησης της υδροφοβικότητας για τους μεταχειρισμένους μονωτήρες ανάρτησης. Σημειώνεται εδώ, πως αυτοί οι μονωτήρες συλλέχθηκαν όλοι από το δίκτυο μέσης τάσης, άρα ήταν όλοι υπό τάση κατά τη λειτουργία τους. Τα συμπεράσματα για το σχήμα 3-10 είναι παρόμοια με αυτά του σχήματος 3-9. Επίσης, από τα σχήματα 3-9 και 3-10 φαίνεται ότι οι μονωτήρες που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι και 10 χρόνια στο ηλεκτρικό δίκτυο δεν έχουν υποβαθμιστεί τόσο ώστε η υδροφοβικότητά τους να φτάσει στην κλάση 7. Φαίνεται ότι χρειάζονται περισσότερα χρόνια λειτουργίας στο δίκτυο, ώστε οι συνθετικοί μονωτήρες να χάσουν εντελώς τις υδρόφοβες ιδιότητες τους (κλάση 7).

Στο σχήμα 3-11 παρατίθενται μερικές αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες ψεκασμένων μονωτήρων που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη διατριβή για την κατηγοριοποίηση τους σε κλάση υδροφοβικότητας.



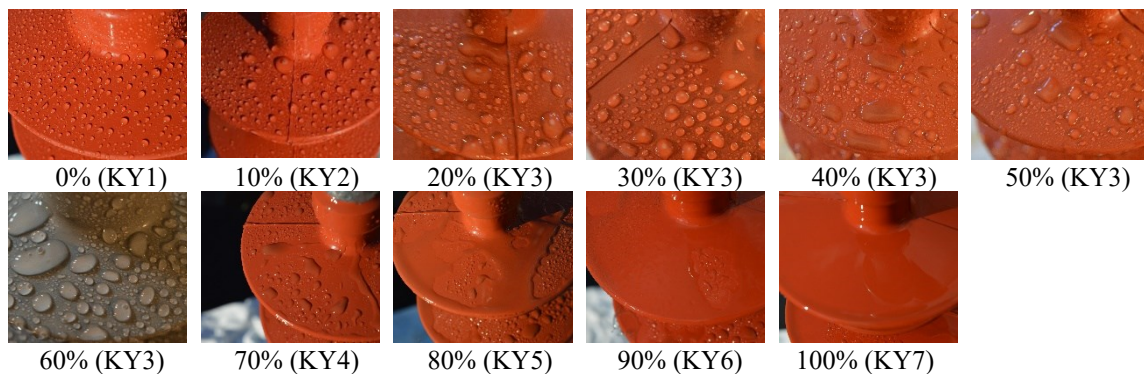
Σχήμα 3-11. Ενδεικτικές φωτογραφίες των κλάσεων υδροφοβικότητας και οι μονωτήρες από τους οποίους λήφθηκαν: (α) KY: 1 → D11, (β) KY: 2 → A210, (γ) KY: 3 → UE14, (δ) KY: 4 → UA21, (ε) KY: 5 → UB23, (ζ) KY: 6 → UB28 (Όπου KY = Κλάση Υδροφοβικότητας).

3.4.1.1.2 Κατάταξη σε κλάσεις υδροφοβικότητας με χρήση συνελκτικού νευρωνικού δικτύου

Ένα σημαντικό πρόβλημα της μεθόδου ψεκασμού της τεχνικής προδιαγραφής IEC TS 62073 [38] είναι ότι το αποτέλεσμα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την υποκειμενική κρίση του χειριστή κατά τη φάση σύγκρισης με τις αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες της τεχνικής προδιαγραφής IEC TS 62073 [38]. Έτσι, στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής πραγματοποιήθηκε εκπαίδευση διαφόρων αρχιτεκτονικών συνελκτικών νευρωνικών δικτύων με σκοπό την αυτόματη κατηγοριοποίηση των φωτογραφιών ψεκασμένων μονωτήρων σε κλάσεις υδροφοβικότητας [219, 220]. Λήφθηκαν περίπου 4500 έγχρωμες φωτογραφίες ψεκασμένων μονωτήρων, οι οποίες ανήκαν στις 7 κλάσεις υδροφοβικότητας που ορίζει η τεχνική προδιαγραφή IEC TS 62073 [38, 220]. Οι φωτογραφίες αυτές υπάρχουν διαθέσιμες στο διαδίκτυο (<https://data.mendeley.com/datasets/56ws3b6379/draft?a=35225fb7-29c3-4cf6-a9e5-8bb60e6b75a7>) για ενδεχόμενη περαιτέρω μελέτη στο θέμα αυτό. Αυτές οι φωτογραφίες χωρίστηκαν σε τρία πακέτα (ομάδες), που χρησιμοποιήθηκαν στα διάφορα στάδια εκπαίδευσης των συνελκτικών νευρωνικών δικτύων. Το πρώτο πακέτο φωτογραφιών, που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων (training process), αποτελούταν από 400 φωτογραφίες για την κάθε κλάση υδροφοβικότητας, δηλαδή συνολικά $400 \times 7 = 2800$ φωτογραφίες. Το δεύτερο πακέτο αποτελούταν από 100 φωτογραφίες για την κάθε κλάση ($100 \times 7 = 700$ φωτογραφίες συνολικά) και χρησιμοποιήθηκε για τη διαδικασία της επαλήθευσης των νευρωνικών δικτύων (validation process). Το τρίτο πακέτο αποτελούταν από 122 – 165 φωτογραφίες για την κάθε κλάση

υδροφοβικότητας (980 φωτογραφίες συνολικά) και χρησιμοποιήθηκε για την τελική αξιολόγηση των συνελκτικών νευρωνικών δικτύων.

Για τη λήψη των φωτογραφιών αυτών χρησιμοποιήθηκαν μόνο καινούριοι μονωτήρες, οι οποίοι ανήκαν στις κλάσεις 1 και 2. Οι φωτογραφίες για τις υπόλοιπες κλάσεις λήφθηκαν από τους ίδιους μονωτήρες, οι οποίοι αυτή τη φορά ψεκάστηκαν με διαλύματα αποσταγμένου νερού και αιθυλικής αλκοόλης (μπλε οινόπνευμα) διαφορετικών συγκεντρώσεων (0% έως 100% κατ' όγκο αιθυλικής αλκοόλης με βήμα 10%) για την τεχνητή κατασκευή των υπολοίπων κλάσεων υδροφοβικότητας. Η αντιστοιχία των συγκεντρώσεων αιθυλικής αλκοόλης σε αποσταγμένο νερό και η κλάση υδροφοβικότητας που προέκυπτε κάθε φορά φαίνεται στο σχήμα 3-12 [219, 220].



Σχήμα 3-12. Αντιστοιχία των κλάσεων υδροφοβικότητας (KY) και της συγκέντρωσης (% κατ' όγκο) αιθυλικής αλκοόλης στο διάλυμα αποσταγμένου νερού – αιθυλική αλκοόλης με το οποίο ψεκάζονταν οι καινούριοι συνθετικοί μονωτήρες για τη δημιουργία φωτογραφιών από όλες τις κλάσεις υδροφοβικότητας.

Οι αρχιτεκτονικές των συνελκτικών νευρωνικών δικτύων που εκπαιδεύτηκαν για την αυτόματη αναγνώριση των κλάσεων υδροφοβικότητας, ήταν:

1. Ένα κατασκευασμένο και παραμετροποιημένο από εμάς, συνελκτικό νευρωνικό δίκτυο (custom).
2. Δύο VGGNet αρχιτεκτονικές συνελκτικών νευρωνικών δικτύων (VGG16 και VGG19) με όλα τους τα βάρη προεκπαιδευμένα (pretrained) σε μία συλλογή φωτογραφιών (dataset), που αποκαλείται ImageNet και περιλαμβάνει πάνω από 14 εκατομμύρια φωτογραφίες που ανήκουν σε 1000 κλάσεις [221]. Σε αυτές τις δύο αρχιτεκτονικές εκπαιδεύτηκαν τα βάρη των τελευταίων συνελκτικών στρωμάτων (convolutional layers) των νευρωνικών δικτύων επάνω στις δικές μας φωτογραφίες [220].
3. Οι προηγούμενες δύο αρχιτεκτονικές (VGG16 και VGG19) προεκπαιδευμένες πάλι στο ImageNet, αλλά αυτή τη φορά προσαρμόζοντας όλα τα βάρη όλων των

συνελικτικών στρωμάτων τους στις δικές μας φωτογραφίες (retrained convolutional networks).

4. Οι αρχιτεκτονικές GoogleNet και Resnet προεκπαιδευμένες στο ImageNet, αλλά προσαρμόζοντας όλα τα βάρη όλων των συνελικτικών στρωμάτων τους στις δικές μας φωτογραφίες (retrained convolutional networks).

Ο υπολογιστής που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων είχε τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Επεξεργαστής: Intel Xeon CPU E5-26200 @ 2.1 GHz
- Μνήμη Ram: 64 GB (4 x 16 GB Kingston HyperX DDR4-2400 MHz CL15 SDRAM (HX424C15FBK2/16))
- Κάρτες γραφικών: 2 x GeForce GTX 1080

Για όλα τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού Python και δύο δημοφιλείς βιβλιοθήκες της, σχετικές με νευρωνικά δίκτυα, οι Tensorflow και Keras. Ο χρόνος εκπαίδευσης του κάθε νευρωνικού δικτύου ήταν περίπου μισή ώρα.

Μελετήθηκαν δύο περιπτώσεις όσον αφορά τις φωτογραφίες των ψεκασμένων μονωτήρων. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν οι φωτογραφίες όπως ήταν (δηλαδή έγχρωμες) και στη δεύτερη περίπτωση οι φωτογραφίες χρησιμοποιήθηκαν αφού πρώτα μετατράπηκαν σε ασπρόμαυρες (grayscale). Αυτό έγινε, ώστε τα νευρωνικά δίκτυα να μην επηρεάζονται από τις χρωματικές διαφοροποιήσεις των συνθετικών μονωτήρων και να μπορούν να κατηγοριοποιούν μονωτήρες οποιουδήποτε χρώματος.

Στον πίνακα 3-9 δίνονται τα αποτελέσματα για την περίπτωση των έγχρωμων φωτογραφιών και στον πίνακα 3-10 τα αποτελέσματα για την περίπτωση που χρησιμοποιήθηκαν οι ασπρόμαυρες φωτογραφίες. Τα αποτελέσματα δίνονται σαν ποσοστά ακρίβειας κατηγοριοποίησης. Αυτά προέκυψαν από το πηλίκο των σωστά κατηγοριοποιημένων φωτογραφιών προς τις συνολικές φωτογραφίες που χρησιμοποιήθηκαν στην τρίτη φάση της εκπαίδευσης των δικτύων, «την τελική αξιολόγηση». Η συνολική ακρίβεια υπολογίστηκε ως μέσος όρος των επιμέρους ακριβειών για κάθε αρχιτεκτονική συνελικτικού νευρωνικού δικτύου.

Πίνακας 3-9. Ακρίβεια κατηγοριοποίησης (σε ποσοστό) συνθετικών μονωτήρων σε κλάσεις υδροφοβικότητας (KY) διαφόρων αρχιτεκτονικών συνελκτικών νευρωνικών δικτύων (ΣΝΔ) για την περίπτωση των έγχρωμων φωτογραφιών [220].

ΣΝΔ	KY1	KY2	KY3	KY4	KY5	KY6	KY7	Συνολική ακρίβεια
Custom	98,18%	93,44%	91,97%	97,42%	82,69%	80,00%	98,14%	91,89%
VGG16 (ImageNet)	97,58%	96,72%	97,81%	96,77%	84,62%	93,57%	93,79%	94,31%
VGG19 (ImageNet)	97,58%	97,54%	94,89%	92,90%	82,69%	92,86%	95,65%	93,34%
VGG16 retrained	98,18%	99,18%	99,27%	98,06%	85,26%	95,71%	98,76%	96,24%
VGG19 retrained	98,18%	98,36%	100,00%	98,06%	92,95%	87,86%	96,27%	95,95%
GoogleNet retrained	98,79%	98,36%	100,00%	99,35%	94,87%	95,00%	99,38%	97,97%
Resnet retrained	98,79%	100,00%	97,08%	98,71%	96,15%	91,43%	100,00%	97,49%

Πίνακας 3-10. Ακρίβεια κατηγοριοποίησης (σε ποσοστό) συνθετικών μονωτήρων σε κλάσεις υδροφοβικότητας (KY) διαφόρων αρχιτεκτονικών συνελκτικών νευρωνικών δικτύων (ΣΝΔ) για την περίπτωση των ασπρόμαυρων φωτογραφιών [220].

ΣΝΔ	KY1	KY2	KY3	KY4	KY5	KY6	KY7	Συνολική ακρίβεια
Custom	93,33%	87,70%	89,78%	87,10%	81,41%	68,57%	98,76%	86,97%
VGG16 (ImageNet)	98,18%	97,54%	96,35%	96,77%	82,69%	75,71%	94,40%	91,70%
VGG19 (ImageNet)	96,96%	95,08%	94,89%	94,84%	88,46%	66,43%	89,44%	89,58%
VGG16 retrained	98,79%	100,00%	95,62%	99,35%	96,15%	88,57%	99,38%	96,91%
VGG19 retrained	98,79%	98,36%	95,62%	99,35%	81,41%	95,71%	98,14%	95,27%
GoogleNet retrained	98,79%	98,36%	100,00%	99,35%	92,95%	95,00%	99,38%	97,68%
Resnet retrained	98,79%	98,36%	98,54%	99,35%	87,18%	93,57%	98,14%	96,24%

Από τα αποτελέσματα των πινάκων 3-9 και 3-10 παρατηρούμε ότι την καλύτερη απόδοση την είχε το νευρωνικό δίκτυο GoogleNet (retrained) με ποσοστό συνολικής ακρίβειας κατηγοριοποίησης 97,97% και 97,68%, όταν χρησιμοποιήθηκαν οι έγχρωμες και οι ασπρόμαυρες φωτογραφίες, αντίστοιχα [220].

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης αυτών των νευρωνικών δικτύων για την κατηγοριοποίηση σε κλάσεις υδροφοβικότητας των συνθετικών μονωτήρων είναι πολλά και σημαντικά.

Κάποια από αυτά είναι τα παρακάτω:

- Οι φωτογραφίες που χρησιμοποιούνται για αναγνώριση δε χρειάζεται να έχουν περιορισμούς σχετικά με την ποιότητα και τη γωνία λήψεως.
- Στην αναγνώριση της κλάσης υδροφοβικότητας δεν παίζει ρόλο το χρώμα των μονωτήρων.
- Ο χρόνος εκπαίδευσης των δικτύων αυτών είναι πολύ μικρός (περίπου μισή ώρα).
- Τα εκπαιδευμένα νευρωνικά δίκτυα μπορούν να ενσωματωθούν σε μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα (drones) και να χρησιμοποιηθούν για την απομακρυσμένη επιθεώρηση των συνθετικών μονωτήρων σε γραμμές μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, ενδεχομένως και όταν οι γραμμές βρίσκονται υπό τάση.

3.4.1.1.3 Κατανομή δυναμικού και έντασης ηλεκτρικού πεδίου σε βρεγμένους συνθετικούς μονωτήρες

Στο πλαίσιο της διδακτορικής αυτής διατριβής, μελετήθηκε η κατανομή του δυναμικού και της έντασης ηλεκτρικού πεδίου σε βρεγμένους συνθετικούς μονωτήρες μέσω προσομοιώσεων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με το πρόγραμμα COMSOL Multiphysics [222]. Κατά τις προσομοιώσεις επιλέχθηκε ο επιλύτης: «Electric Currents» και το μοντέλο ορίστηκε σε κατάσταση «Stationary», κατά την οποία οι μεταβλητές πεδίου δεν αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου.

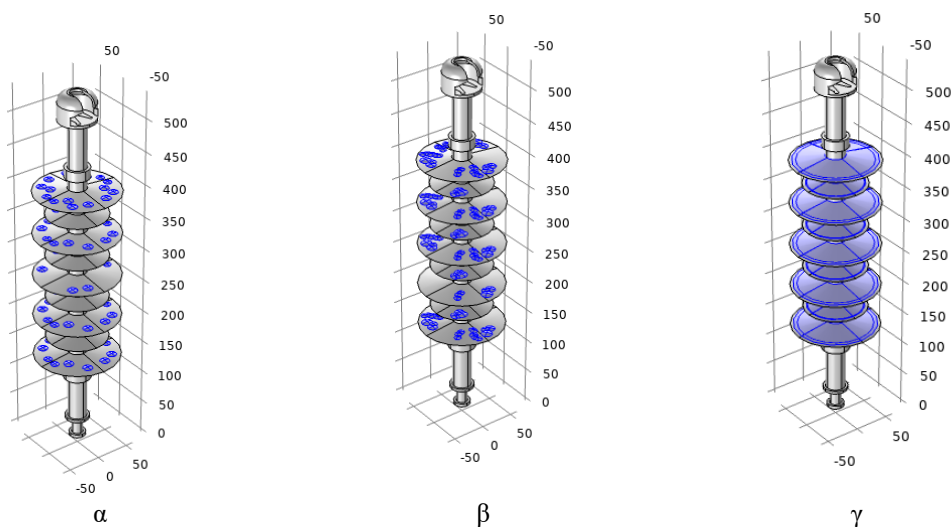
Μελετήθηκαν δύο μοντέλα συνθετικών μονωτήρων και συγκεκριμένα, ένας συνθετικός μονωτήρας ανάρτησης και ένας στήριξης του κατασκευαστή A. Σε αυτές τις προσομοιώσεις θεωρήθηκε ότι οι μονωτήρες είχαν επάνω τους σταγόνες αλμυρού νερού κατανεμημένες, έτσι ώστε να αντιστοιχούν στις κλάσεις υδροφοβικότητας 2, 4 και 7 της τεχνικής προδιαγραφής IEC TS 62073 [38]. Επίσης, το υλικό των σταγόνων αυτών ορίστηκε να είναι το νερό, έτσι ώστε να προσομοιωθεί μία πραγματική κατάσταση ενός μονωτήρα, τοποθετημένου σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο μέσης τάσης (20 kV) κοντά σε παραθαλάσσια - παράκτια περιοχή (π.χ. σε κάποιο νησί της Ελλάδας). Οι προσομοιώσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με επεξεργαστή 24 πυρήνων χρονισμένων στα 4,20 GHz και με μνήμη RAM 32 GB. Ο χρόνος των προσομοιώσεων αυτών κυμάνθηκε από 2 έως 6 λεπτά, ανάλογα με τη γεωμετρία του κάθε μοντέλου.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις αυτές αναγράφονται παρακάτω, καθώς επίσης και οι ιδιότητες τους φαίνονται στον πίνακα 3-11:

- ♦ Σιλικονούχο καουτσούκ με τριένυδρη αλουμίνα ως πληρωτικό υλικό (Silicone Rubber with ATH filler), για το μονωτικό περίβλημα των μονωτήρων.
- ♦ Πλαστικό ενισχυμένο με γυάλινες ίνες (Glass Fiber Reinforced Plastic - GFRP) , για τη ράβδο των μονωτήρων.
- ♦ Γαλβανισμένο ατσάλι (Galvanized Steel), για τους μεταλλικούς ακροδέκτες των μονωτήρων. Για το υλικό αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλεγμένες ιδιότητες του λογισμικού COMSOL Multiphysics.
- ♦ Νερό για τις σταγόνες επάνω στους μονωτήρες.
- ♦ Αέρας για την περιοχή γύρω από τους μονωτήρες.

Πίνακας 3-11. Ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις.

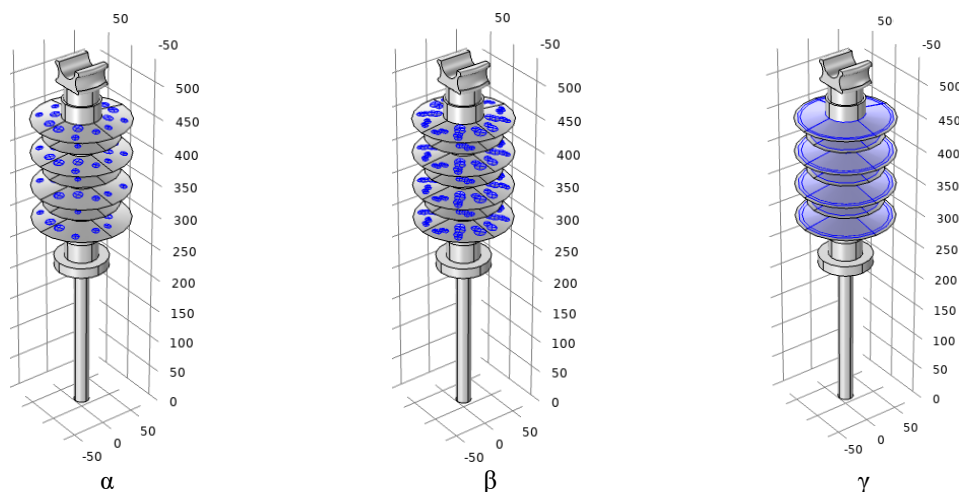
Υλικό	Ηλεκτρική αγωγιμότητα σ [S/m]	Διηλεκτρική σταθερά ϵ_r
Silicone Rubber with ATH	10^{-12}	3,7
GFRP	10^{-14}	5,2
Νερό	5	80
Αέρας	10^{-13}	1



Σχήμα 3-13. Μοντέλα συνθετικού μονωτήρα ανάρτησης του κατασκευαστή A με νερό στην επιφάνεια τους, τα οποία ανήκουν στην υδροφοβική κλάση: (α) 2, (β) 4, (γ) 7.

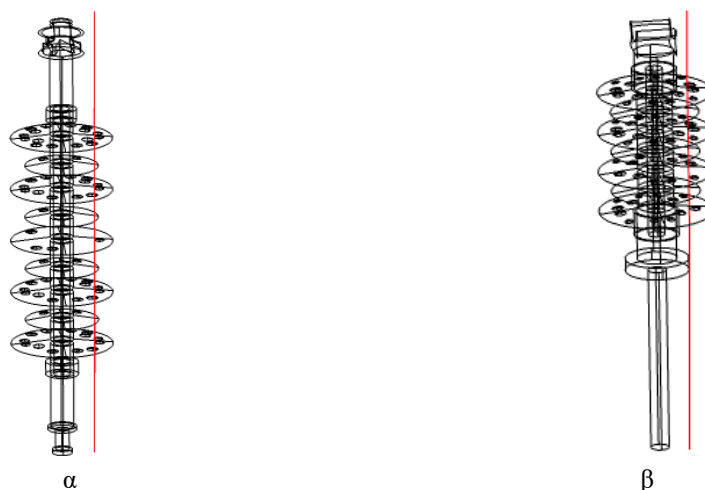
Στο σχήμα 3-13 φαίνονται τα μοντέλα του συνθετικού μονωτήρα ανάρτησης του κατασκευαστή A και στο σχήμα 3-14 τα αντίστοιχα μοντέλα του συνθετικού μονωτήρα στήριξης, τα οποία σχεδιάστηκαν για τις προσομοιώσεις αυτές. Σημειώνεται εδώ, ότι στα μοντέλα του μονωτήρα ανάρτησης (σχήμα 3-13) η τάση εφαρμόστηκε στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη και στον επάνω η γείωση και στο μονωτήρα στήριξης (σχήμα 3-14) η τάση εφαρμόστηκε στον επάνω μεταλλικό ακροδέκτη και η γείωση στον κάτω, όπως δηλαδή είναι σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Η τάση που εφαρμόστηκε ήταν ίση με $(20 \text{ kV} / \sqrt{3}) = 11,55 \text{ kV}$, που είναι η φασική τάση ενός δικτύου μέσης τάσης με πολική

τάση 20 kV. Επίσης, έγιναν προσομοιώσεις και στους αντίστοιχους στεγνούς μονωτήρες, δηλαδή χωρίς να έχουν σταγόνες νερού επάνω τους.



Σχήμα 3-14. Μοντέλα συνθετικού μονωτήρα στήριξης του κατασκευαστή Α με νερό στην επιφάνεια τους, τα οποία ανήκουν στην υδροφοβική κλάση: (α) 2, (β) 4, (γ) 7.

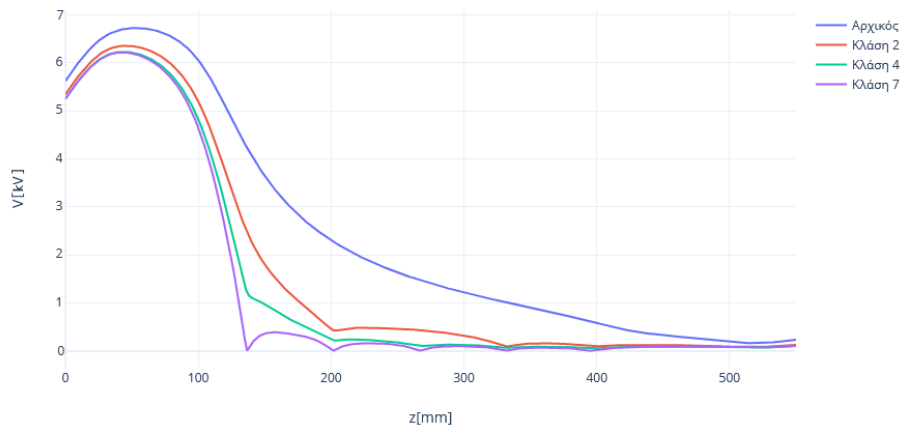
Η κατανομή του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου λήφθηκε κατά μήκος γραμμών παράλληλων στους μονωτήρες, που ακουμπούσαν όλα τα κύαθια τους και φαίνονται με κόκκινο χρώμα στο σχήμα 3-15. Στο σχήμα 3-15 (α) φαίνεται η γραμμή στο μονωτήρα ανάρτησης, ο οποίος ανήκει στην κλάση υδροφοβικότητας 2 και στο σχήμα 3-15 (β) στο μονωτήρα στήριξης κλάσης υδροφοβικότητας 2. Αντίστοιχα, τοποθετήθηκαν οι γραμμές και στα υπόλοιπα μοντέλα μονωτήρων.



Σχήμα 3-15. Γραμμές κατά μήκος των οποίων λήφθηκαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων (κατανομή δυναμικού και έντασης ηλεκτρικού πεδίου) για όλα τα μοντέλα μονωτήρων. Εδώ φαίνονται ενδεικτικά οι γραμμές αυτές με κόκκινο χρώμα στα μοντέλα: (α) μονωτήρας ανάρτησης με κλάση υδροφοβικότητας 2 και (β) μονωτήρας στήριξης με κλάση υδροφοβικότητας 2.

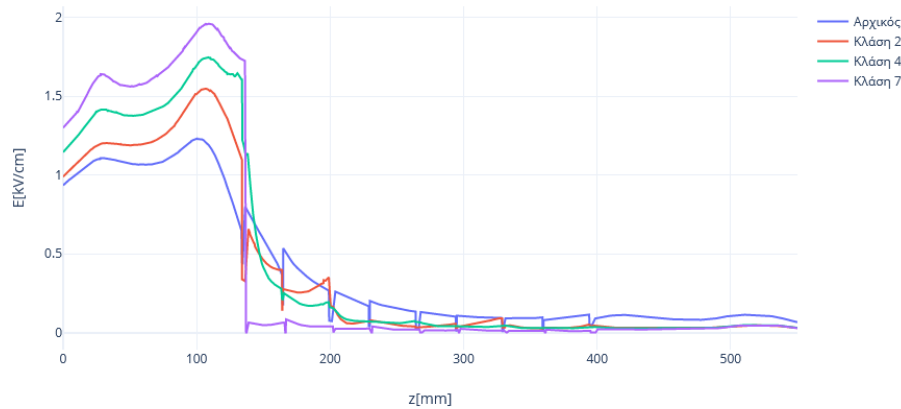
Τα αποτελέσματα για το μονωτήρα ανάρτησης που λήφθηκαν από τις προσομοιώσεις φαίνονται στο σχήμα 3-16 (κατανομή δυναμικού) και στο σχήμα 3-17 (κατανομή έντασης

ηλεκτρικού πεδίου), όπου «Αρχικός» είναι ο στεγνός μονωτήρας (χωρίς σταγόνες επάνω του).

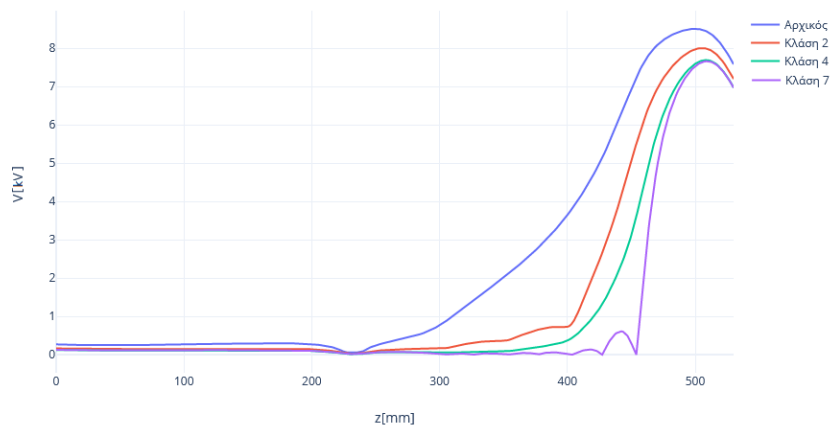


Σχήμα 3-16. Κατανομή δυναμικού στα μοντέλα με και χωρίς σταγόνες για το μονωτήρα ανάρτησης.

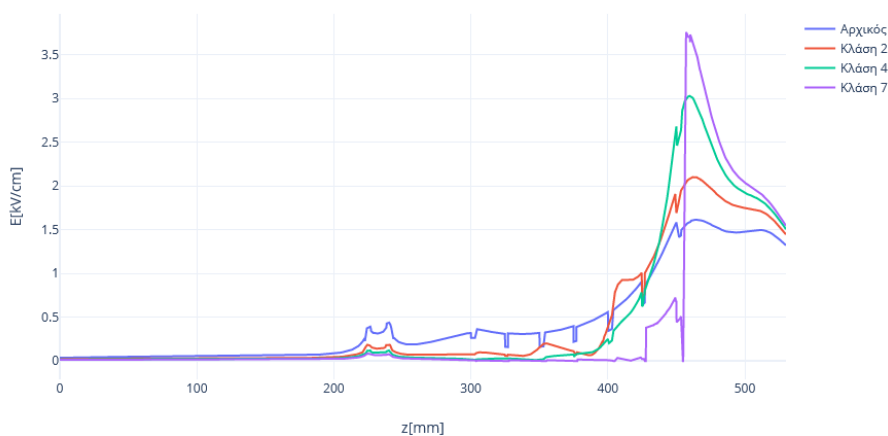
Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το μονωτήρα στήριξης φαίνονται στα σχήματα 3-18 (κατανομή δυναμικού) και 3-19 (κατανομή έντασης ηλεκτρικού πεδίου), όπου «Αρχικός» είναι ο στεγνός μονωτήρας (χωρίς σταγόνες επάνω του).



Σχήμα 3-17. Κατανομή έντασης ηλεκτρικού πεδίου στα μοντέλα με και χωρίς σταγόνες για το μονωτήρα ανάρτησης.



Σχήμα 3-18. Κατανομή δυναμικού στα μοντέλα με και χωρίς σταγόνες για το μονωτήρα στήριξης.



Σχήμα 3-19. Κατανομή έντασης ηλεκτρικού πεδίου στα μοντέλα με και χωρίς σταγόνες για το μονωτήρα στήριξης.

Τα συμπεράσματα για τους δύο τύπους μονωτήρων (ανάρτησης και στήριξης) είναι παρόμοια. Αρχικά, παρατηρούμε στα σχήματα 3-16 και 3-18 ότι το δυναμικό είναι υψηλότερο στους στεγνούς μονωτήρες (Αρχικοί), κοιτώντας τις μέγιστες τιμές, και καθώς αυξάνεται η κλάση υδροφοβικότητας, το δυναμικό μειώνεται. Από την άλλη παρατηρούμε στα σχήματα 3-17 και 3-19 ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (μέγιστες τιμές) ακολουθεί την αντίστροφη λογική, δηλαδή όσο αυξάνεται η κλάση υδροφοβικότητας, τόσο γίνεται μεγαλύτερη η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στους δύο μονωτήρες. Επομένως, από αυτές τις προσομοιώσεις μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι: καθώς το υλικό των συνθετικών μονωτήρων γηράσκει όλο και περισσότερο με τα χρόνια λειτουργίας τους στο δίκτυο, και άρα η κλάση υδροφοβικότητας τους μεγαλώνει, τόσο μεγαλύτερες εντάσεις ηλεκτρικού πεδίου θα εμφανίζονται κοντά στο άκρο των μονωτήρων, το οποίο έρχεται σε επαφή με την τάση.

3.4.1.2 Μέτρηση της σκληρότητας Shore A

3.4.1.2.1 Μετρήσεις σκληρότητας Shore A σε καινούριους και μεταχειρισμένους συνθετικούς μονωτήρες

Για τη μέτρηση της σκληρότητας Shore A ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στο Πρότυπο ISO 48-4 [59] και αναλύεται στο υποκεφάλαιο 2.2.1.2 της παρούσης διδακτορικής διατριβής. Πιο συγκεκριμένα, σε αυτή τη διδακτορική διατριβή χρησιμοποιήθηκε το όργανο: HPE II Digital Hardness Tester της εταιρίας Bareiss και ο χρόνος λήψης της μέτρησης ορίστηκε στα 3 s. Πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές μετρήσεων σκληρότητας στους συνθετικούς μονωτήρες. Την πρώτη φορά στους μονωτήρες όπως ήταν και τη δεύτερη φορά στους μονωτήρες, αφού αυτοί είχαν υποβληθεί σε μια διαδικασία τεχνητής γήρανσης. Η τεχνητή αυτή γήρανση πραγματοποιήθηκε μέσω βρασμού των δοκιμίων, σε κατάλληλο δοχείο (από ανοξείδωτο ατσάλι) για 42 ώρες μέσα σε διάλυμα απιονισμένου νερού με 0,1% κατά βάρος χλωριούχο νάτριο (NaCl), όπως περιγράφεται στο Πρότυπο IEC 62217 [151]. Η συσκευή (βραστήρας) που χρησιμοποιήθηκε για το βρασμό φαίνεται στο σχήμα 3-20. Μετά τις 42 ώρες βρασμού η μέτρηση πραγματοποιούνταν μέσα σε διάστημα 3 ωρών.

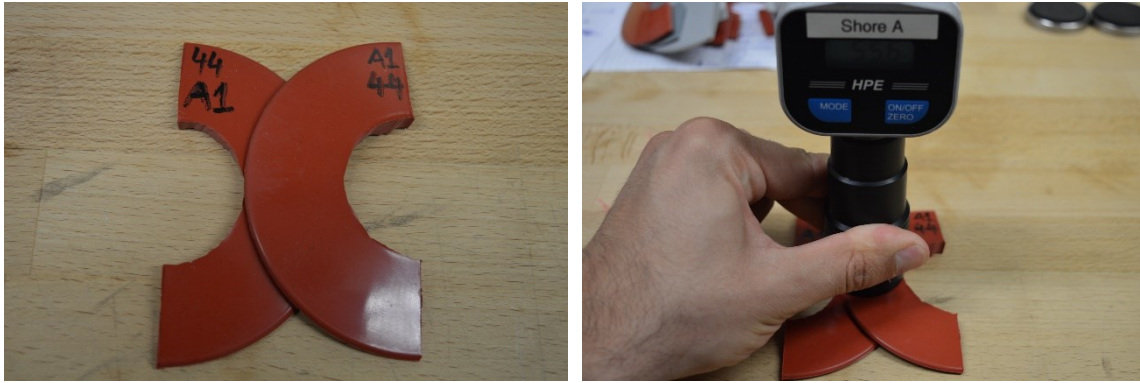
Μια δυσκολία που υπάρχει κατά τη μέτρηση της σκληρότητας Shore A σε ολοκληρωμένους συνθετικούς μονωτήρες (τελικά προϊόντα) είναι ότι το Πρότυπο ISO 48-4 [59] περιγράφει τη διαδικασία της μέτρησης αυτής σε δοκίμια συγκεκριμένων διαστάσεων, κατασκευασμένων εξ αρχής για την πραγματοποίηση της μέτρησης. Δεν αναφέρεται πουθενά στο ISO 48-4 [59] ο τρόπος με τον οποίο θα πρέπει να γίνεται η μέτρηση σε συνθετικούς μονωτήρες (τελικά προϊόντα). Σε αυτή τη διδακτορική διατριβή προτείνονται διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορεί να πραγματοποιηθεί η μέτρηση σε συνθετικούς μονωτήρες, καθώς επίσης και παρατηρήσεις και συμβουλές για το τι θα πρέπει να προσέχει κανείς κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Ενδεικτικά αναφέρεται εδώ ότι η μέτρηση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί: 1) στο πρώτο κυάθιο χωρίς να απαιτείται να κοπεί το κυάθιο από το μονωτήρα, 2) σε ένα μισό κυάθιο το οποίο θα έχει κοπεί από το μονωτήρα, 3) σε 2 μισά κυάθια τοποθετημένα το ένα επάνω στο άλλο, τα οποία θα πρέπει να έχουν κοπεί από το μονωτήρα, 4) στο μονωτικό περίβλημα του μονωτήρα αφού πρώτα έχουν αφαιρεθεί όλα τα κυάθια από επάνω του. Επίσης, η συσκευή μέτρησης της σκληρότητας (HPE II Digital Hardness Tester της εταιρίας Bareiss) μπορεί να χρησιμοποιηθεί, είτε σαν φορητή συσκευή, είτε στηριγμένη σε βάση στήριξης.

Περισσότερες λεπτομέρειες, παρατηρήσεις και συμβουλές για τη μέτρηση αυτή υπάρχουν στη δημοσίευση [223], η οποία συγγράφηκε στο πλαίσιο αυτού του διδακτορικού.



Σχήμα 3-20. Συσκευή (βραστήρας) που χρησιμοποιήθηκε για την καταπόνηση των κυαθίων των μονωτήρων σε βρασμό 42 ωρών.

Στο πλαίσιο αυτού του διδακτορικού οι μετρήσεις σκληρότητας πραγματοποιήθηκαν σε έναν καινούριο μονωτήρα από κάθε κατασκευαστή και από κάθε τύπο και σε έναν μεταχειρισμένο μονωτήρα από κάθε χρωματική ομάδα των πινάκων 3-5 και 3-6. Σε κάθε έναν από αυτούς τους μονωτήρες πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε ένα μισό και σε δύο μισά κυάθια τοποθετημένα το ένα επάνω στο άλλο πριν και μετά το βρασμό των 42 ωρών, αφού αυτά αφαιρέθηκαν με μαχαίρι από τους μονωτήρες. Το Πρότυπο ISO 48-4 [59] απαιτεί 5 μετρήσεις στην επιφάνεια του μονωτήρα. Αρχικά, οι μετρήσεις λήφθηκαν στο ένα μισό κυάθιο και στη συνέχεια τοποθετώντας τα 2 μισά κυάθια το ένα πάνω στο άλλο, ώστε να καλυφθεί η απαίτηση του Προτύπου ISO 48-4 [59] για τουλάχιστον 6 mm πάχος δοκιμίου. Τα δύο μισά κυάθια τοποθετούνταν όπως φαίνεται στο σχήμα 3-21, ώστε να γίνεται αναίρεση των κλίσεων των κυαθίων και να γίνεται η μέτρηση σε μια κατά προσέγγιση επίπεδη επιφάνεια.

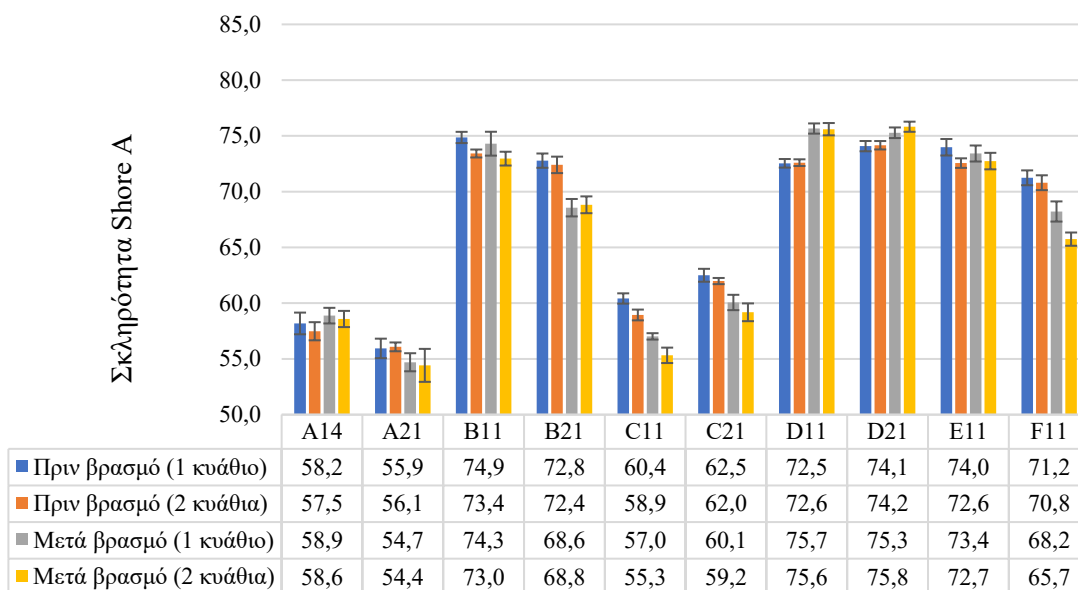


Σχήμα 3-21. Μέτρηση της σκληρότητας στο μονωτήρα A14 κυάθιο 4 τοποθετώντας τα δύο μισά μέρη του κυαθίου το ένα επάνω στο άλλο, ώστε να καλύπτεται η απαίτηση του προτύπου ISO 48-4 [59] για πάχος δοκιμίου 6 mm.

Στο σχήμα 3-22 φαίνονται οι μετρήσεις της σκληρότητας Shore A, οι οποίες λήφθηκαν στους καινούριους συνθετικούς μονωτήρες, σε ένα μισό κυάθιο και σε δύο μισά κυάθια τοποθετημένα το ένα επάνω στο άλλο, πριν το βρασμό και μετά το βρασμό. Επίσης, στο σχήμα 3-22 φαίνονται και οι τιμές των μετρήσεων για μεγαλύτερη πληρότητα. Παρατηρείται πως υπάρχουν διαφορές στις μετρήσεις της σκληρότητας μεταξύ μονωτήρων από διαφορετικούς κατασκευαστές, πιθανόν λόγω διαφορετικών μειγμάτων στο υλικό του μονωτικού περιβλήματος και των προσμίξεων που περιέχονται, καθώς επίσης και λόγω διαφορών στις κατασκευαστικές διαδικασίες. Το μονωτικό περίβλημα όλων των μονωτήρων του σχήματος 3-22 ήταν κατασκευασμένο από HTV Silicone Rubber με προσμίξεις ATH, σύμφωνα με τις προδιαγραφές των κατασκευαστών τους. Συνεπώς, από το σχήμα 3-22 παρατηρούμε ότι η μέτρηση της σκληρότητας Shore A σε καινούριους συνθετικούς μονωτήρες που το μονωτικό περίβλημά τους είναι κατασκευασμένο από HTV Silicone Rubber με πληρωτικό υλικό ATH είναι στο εύρος 56 – 75 μονάδες σκληρότητας. Αυτή η παρατήρηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν κατευθυντήρια γραμμή για το τι τιμές σκληρότητας θα πρέπει να περιμένει κανείς όταν μετράει καινούριους συνθετικούς μονωτήρες που το μονωτικό τους περίβλημα είναι κατασκευασμένο από το παραπάνω υλικό.

Επίσης, από το σχήμα 3-22 παρατηρούμε ότι η διαδικασία τεχνητής γήρανσης μέσω βρασμού σε νερό δεν έδωσε σαφή συμπεράσματα. Συγκεκριμένα, σε κάποιους μονωτήρες (A14, D11, D21) η σκληρότητα αυξήθηκε μετά από το βρασμό και σε κάποιους μειώθηκε (A21, B11, B21, C11, C21, E11, F11).

Καινούριοι μονωτήρες



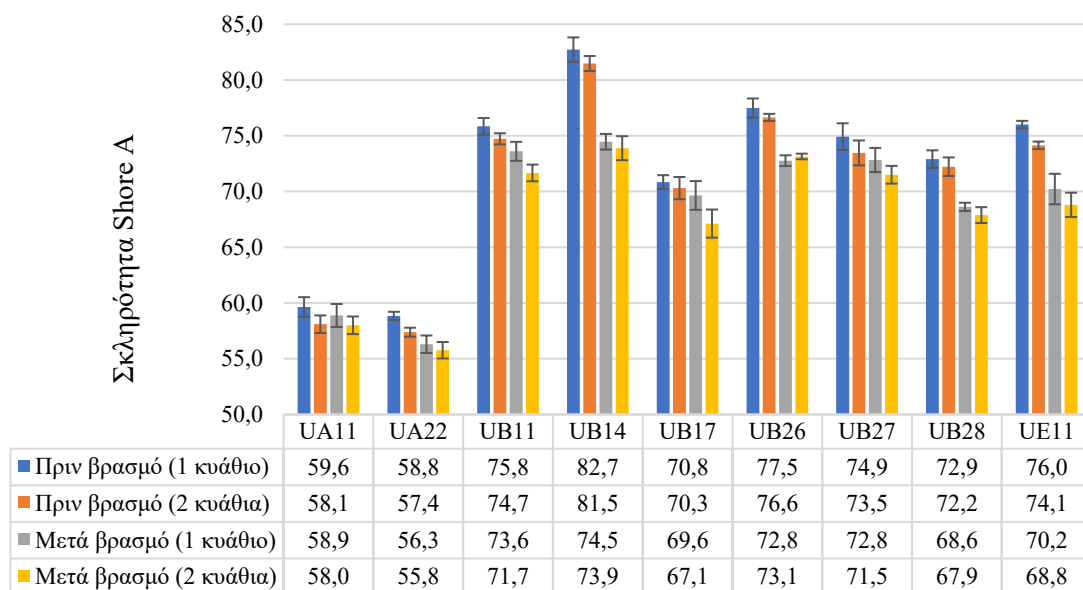
Σχήμα 3-22. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις (αγκύλες σφάλματος) των μετρήσεων σκληρότητας Shore A για τους καινούριους μονωτήρες.

Στο σχήμα 3-23 φαίνονται οι μετρήσεις σκληρότητας Shore A στους μεταχειρισμένους συνθετικούς μονωτήρες. Εδώ βλέπουμε αρκετές διαφορές στη σκληρότητα ακόμα και μεταξύ μονωτήρων ίδιου κατασκευαστή, οι οποίες δικαιολογούνται από τα διαφορετικά χρόνια λειτουργίας του κάθε μονωτήρα στο δίκτυο. Επιπλέον στο σχήμα 3-23 παρατηρούμε ότι ο βρασμός έδωσε τα αντίθετα αποτελέσματα από αυτά που αναμέναμε. Εφόσον ο βρασμός πρόκειται για μια διαδικασία τεχνητής γήρανσης του υλικού των μονωτήρων, περιμέναμε η σκληρότητα τους να αυξηθεί μετά το βρασμό. Στο σχήμα 3-23 φαίνεται ότι η σκληρότητα σε όλους τους μεταχειρισμένους μονωτήρες μειώθηκε. Αυτό ίσως συνέβη λόγω του ότι, κατά το βρασμό, το υλικό απορροφά μια μικρή ποσότητα νερού με συνέπεια να μειώνεται η σκληρότητα του. Το συμπέρασμα ότι το υλικό απορροφά κάποια ποσότητα νερού με το βρασμό διαπιστώθηκε μέσω ζύγισης των δοκιμίων πριν και μετά το βρασμό. Μετά το βρασμό τα δοκίμια ζύγιζαν περίπου 1% περισσότερο από ότι πριν το βρασμό.

Το σχήμα 3-24 περιλαμβάνει κάποιες από τις μετρήσεις του σχήματος 3-22 και κάποιες του σχήματος 3-23 και δημιουργήθηκε για να είναι πιο εμφανείς οι συγκρίσεις μεταξύ καινούριων και μεταχειρισμένων μονωτήρων του ίδιου κατασκευαστή. Σε όλους τους κατασκευαστές παρατηρείται ότι οι καινούριοι μονωτήρες έχουν χαμηλότερη τιμή σκληρότητας από τους μεταχειρισμένους εκτός από την περίπτωση του B11 και του UB17, όπου ο μεταχειρισμένος εμφάνισε χαμηλότερες τιμές. Για αυτό το φαινόμενο δεν υπάρχει

προφανής εξήγηση. Ένας πιθανός λόγος που θα μπορούσε να συμβαίνει αυτό είναι ότι επειδή ο B11 κατασκευάστηκε το 2017 και ο UB17 το 2016, ίσως τότε ο κατασκευαστής Β να έκανε κάποια αλλαγή στην κατασκευαστική διαδικασία του ή να άλλαξε κάποια αναλογία στα υλικά που χρησιμοποίησε. Επίσης, θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι ο UB17 δεν ήταν εγκατεστημένος σε ηλεκτρικό δίκτυο και έτσι δεν είχε υποστεί καταπόνηση από τη λειτουργία του στο δίκτυο. Ο συγκεκριμένος μονωτήρας ήταν παρατημένος σε εξωτερικό χώρο στο ΚΔΕΠ για 4 χρόνια υφιστάμενος τις καιρικές καταπονήσεις. Τέλος, από το σχήμα 3-24 προκύπτει ότι όσο περισσότερα χρόνια έχει ένας μονωτήρας στο δίκτυο τόσο αυξάνεται η σκληρότητα του. Με αυτόν τον τρόπο η σκληρότητα Shore A στους συνθετικούς μονωτήρες μπορεί να αποτελέσει έναν δείκτη της γήρανσης του μονωτικού περιβλήματος τους. Η παραπάνω παρατήρηση έχει παρουσιαστεί και στη δημοσίευση [224], όπου ως δείγματα χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί μονωτήρες από αυτούς των σχημάτων 3-22, 3-23 και 3-24.

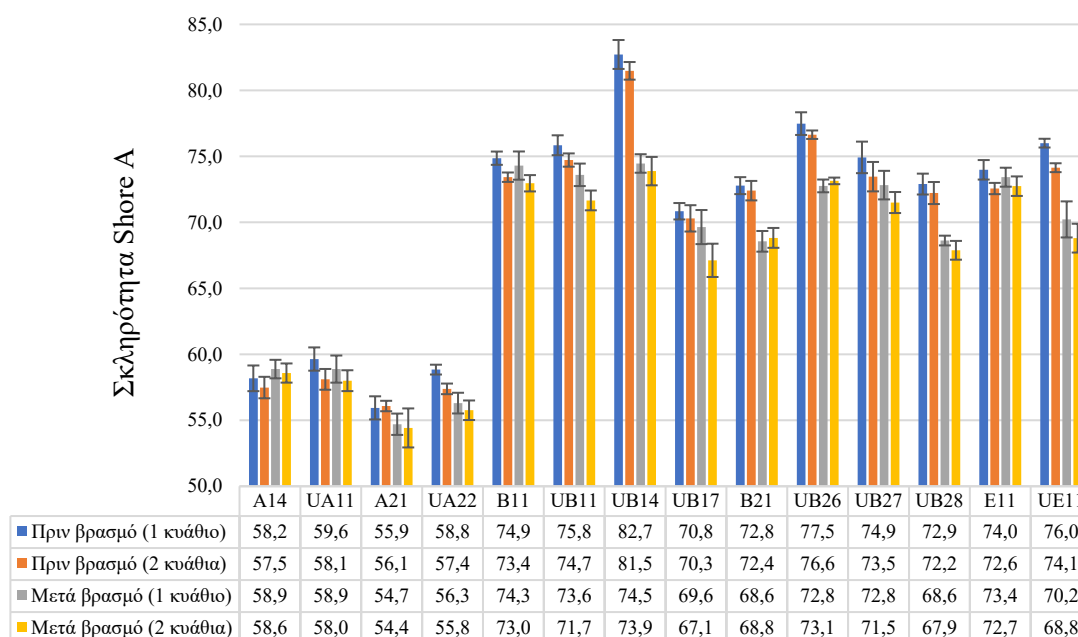
Μεταχειρισμένοι μονωτήρες



Σχήμα 3-23. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις (αγκύλες σφάλματος) των μετρήσεων σκληρότητας Shore A για τους μεταχειρισμένους μονωτήρες.

Τέλος, σημειώνεται ως γενική παρατήρηση στα σχήματα 3-22, 3-23 και 3-24 ότι όταν χρησιμοποιούνται δύο μισά κιάθια τοποθετημένα το ένα επάνω στο άλλο (δηλαδή όταν αυξάνεται το πάχος του δοκιμίου) για τη μέτρηση της σκληρότητας, τότε αυτή συνήθως μειώνεται ελάχιστα (εντός των ορίων της αβεβαιότητας της μέτρησης, όπως αυτή προκύπτει στο σχήμα 3-37).

Σύγκριση καινούριων - μεταχειρισμένων μονωτήρων



Σχήμα 3-24. Συγκριτικό γράφημα μέσω των όρων σκληρότητας Shore A και τυπικών αποκλίσεων (αγκύλες σφάλματος) καινούριων και μεταχειρισμένων μονωτήρων του κάθε κατασκευαστή.

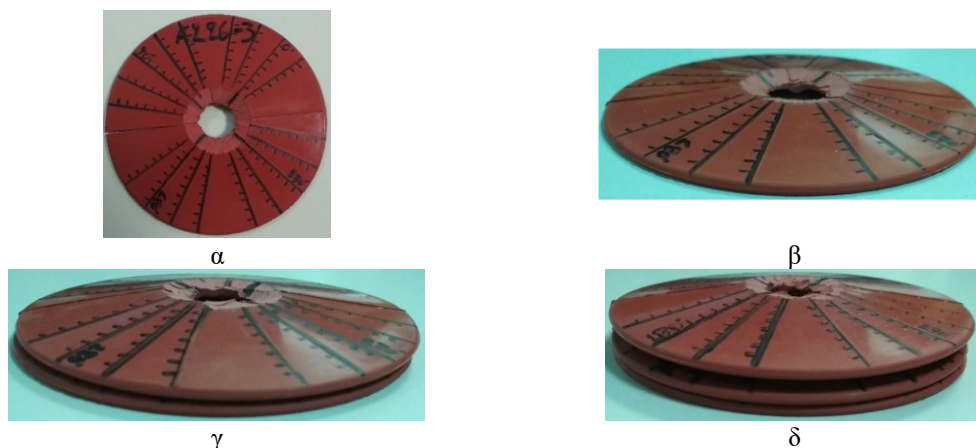
3.4.1.2.2 Επίδραση του πάχους των δοκιμίων στη μέτρηση της σκληρότητας Shore A

Στο πλαίσιο αυτής της διδακτορικής διατριβής πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε κυάθια 5 συνθετικών μονωτήρων με σκοπό να διαφανεί η σημασία που έχει το πάχος των δοκιμίων στη μέτρηση αυτή. Υπενθυμίζεται εδώ πως το Πρότυπο ISO 48-4 [59] αναφέρει ότι το πάχος των δοκιμίων θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 6 mm, απαίτηση η οποία τις περισσότερες φορές δε μπορεί να ικανοποιηθεί, όταν πρόκειται για κυάθια συνθετικών μονωτήρων. Οι μετρήσεις έγιναν στον καινούριο μονωτήρα A226, καθώς επίσης και σε άλλους 4 μονωτήρες των 24 kV (μέσης τάσης) εκ των οποίων τρεις ήταν ανάρτησης και ένας στήριξης. Οι κωδικοποιημένες ονομασίες που δόθηκαν σε αυτούς τους μονωτήρες, καθώς και τα χαρακτηριστικά τους, αναφέρονται παρακάτω:

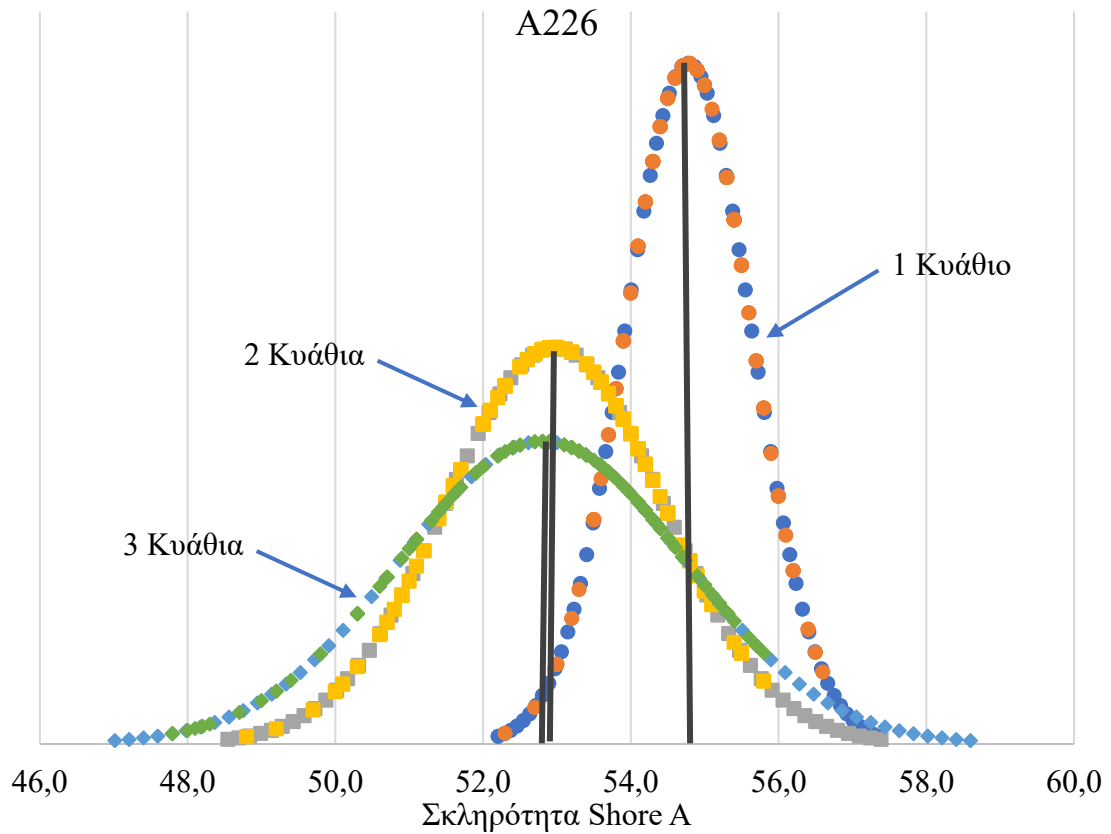
- ZRS2N, ο οποίος ήταν καινούριος συνθετικός μονωτήρας ανάρτησης του κατασκευαστή A,
- GNP4, ο οποίος ήταν μεταχειρισμένος συνθετικός μονωτήρας στήριξης του κατασκευαστή B με 9 χρόνια λειτουργίας στο δίκτυο,
- GNS3, ο οποίος ήταν μεταχειρισμένος συνθετικός μονωτήρας ανάρτησης του κατασκευαστή B με 4 χρόνια λειτουργίας στο δίκτυο και

- ZBS1, ο οποίος ήταν μεταχειρισμένος συνθετικός μονωτήρας ανάρτησης ενός κατασκευαστή, που δε χρησιμοποιήθηκε σε άλλες μετρήσεις σε αυτή τη διατριβή, με 9 χρόνια λειτουργίας στο δίκτυο [225].

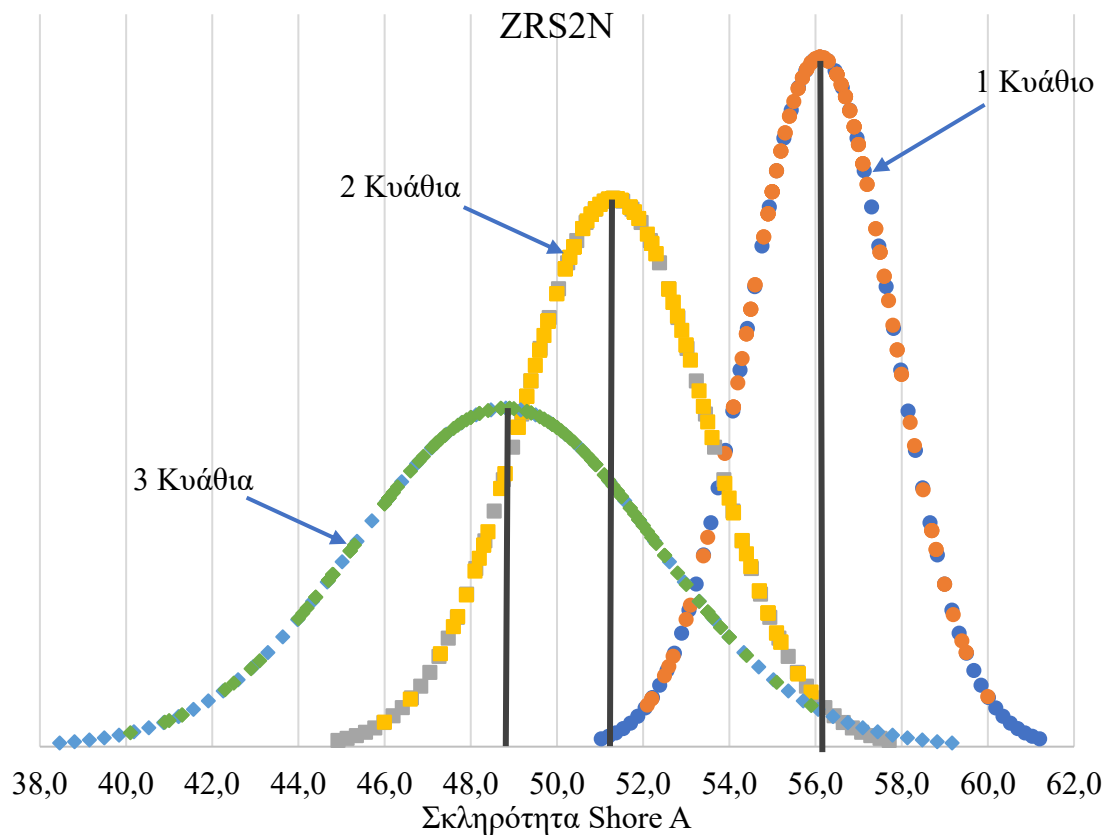
Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για τη λήψη των μετρήσεων ήταν η εξής: όπως φαίνεται στο σχήμα 3-25 κόπηκαν με μαχαίρι 3 κυάθια από τον κάθε μονωτήρα και οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν διαδοχικά, σε ένα κυάθιο (πάχος < 6 mm), σε δύο κυάθια τοποθετημένα το ένα επάνω στο άλλο (πάχος > 6 mm) και σε τρία κυάθια το ένα επάνω στο άλλο (πάχος >> 6 mm). Το Πρότυπο ISO 48-4 [59] δεν επιτρέπει να γίνεται η μέτρηση σε παραπάνω από 3 κυάθια το ένα επάνω στο άλλο. Το κάθε κυάθιο χωρίστηκε σε 7 ομόκεντρους κύκλους (5 για τον GNS3 γιατί το μέγεθος των κυαθίων του δεν επαρκούσε για παραπάνω) οι οποίοι αριθμήθηκαν ως εξής: ο κύκλος με αριθμό 1 ήταν ο εξωτερικός κύκλος (κοντά στην περίμετρο του κυαθίου) και ο κύκλος με αριθμό 7 ήταν ο εσωτερικός. Κάθε ομόκεντρος κύκλος χωρίστηκε σε 18 σημεία, ανά κάποια απόσταση μεταξύ τους και στα σημεία αυτά λήφθηκαν οι μετρήσεις. Συνολικά λήφθηκαν 378 μετρήσεις (126 σε ένα κυάθιο, 126 σε δύο κυάθια και 126 σε τρία κυάθια) για τον κάθε μονωτήρα (εκτός του GNS3 για τον οποίο οι μετρήσεις ήταν $90 \times 3 = 180$ συνολικά). Μετά τη λήψη των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε υπολογισμός της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης τους και σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα της κανονικής κατανομής και των μετρήσεων που λήφθηκαν για την κάθε περίπτωση, όπως αυτά φαίνονται στα σχήματα 3-26 – 3-30.



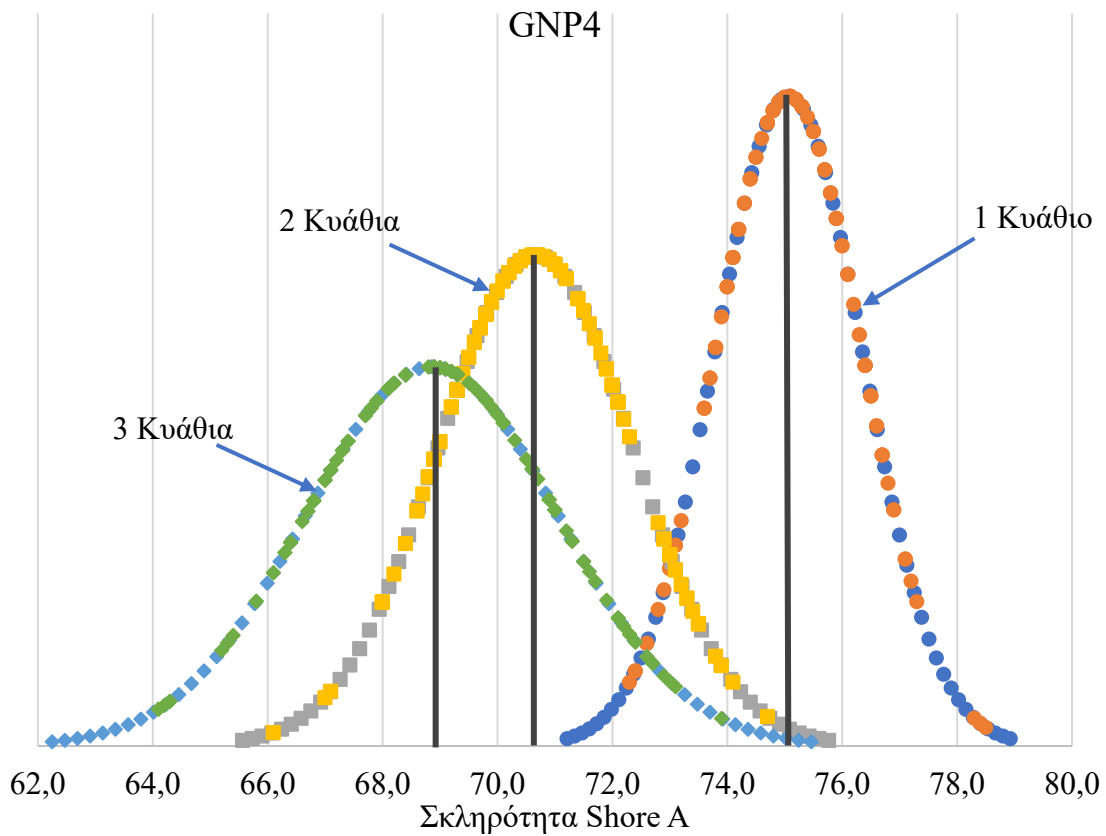
Σχήμα 3-25. Τρία κυάθια που κόπηκαν με μαχαίρι από το μονωτήρα A226: α) 7 ομόκεντροι κύκλοι και τα σημεία μέτρησης της σκληρότητας, β) μετρήσεις σε ένα κυάθιο (πάχος < 6 mm), γ) μετρήσεις σε δύο κυάθια τοποθετημένα το ένα επάνω στο άλλο (πάχος > 6 mm) και δ) μετρήσεις σε τρία κυάθια το ένα επάνω στο άλλο (πάχος >> 6 mm) [226].



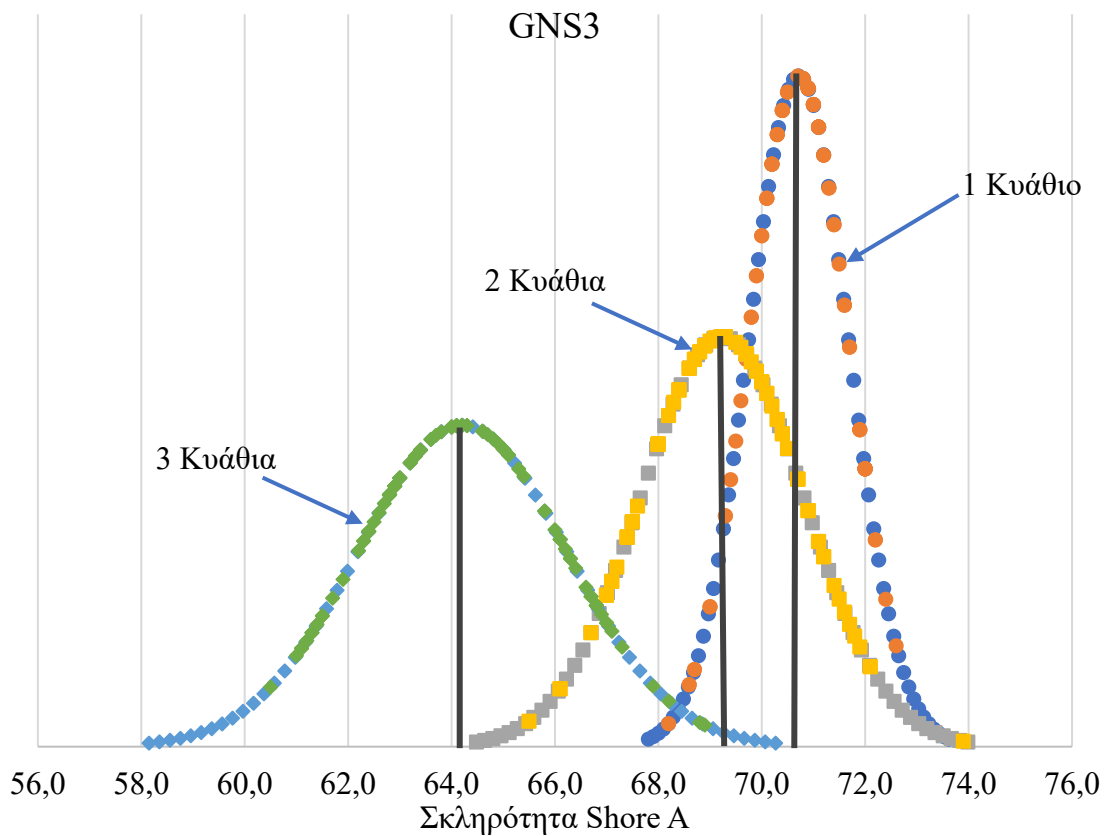
Σχήμα 3-26. Κανονικές κατανομές για τις μετρήσεις σκληρότητας Shore A στο μονωτήρα A226.



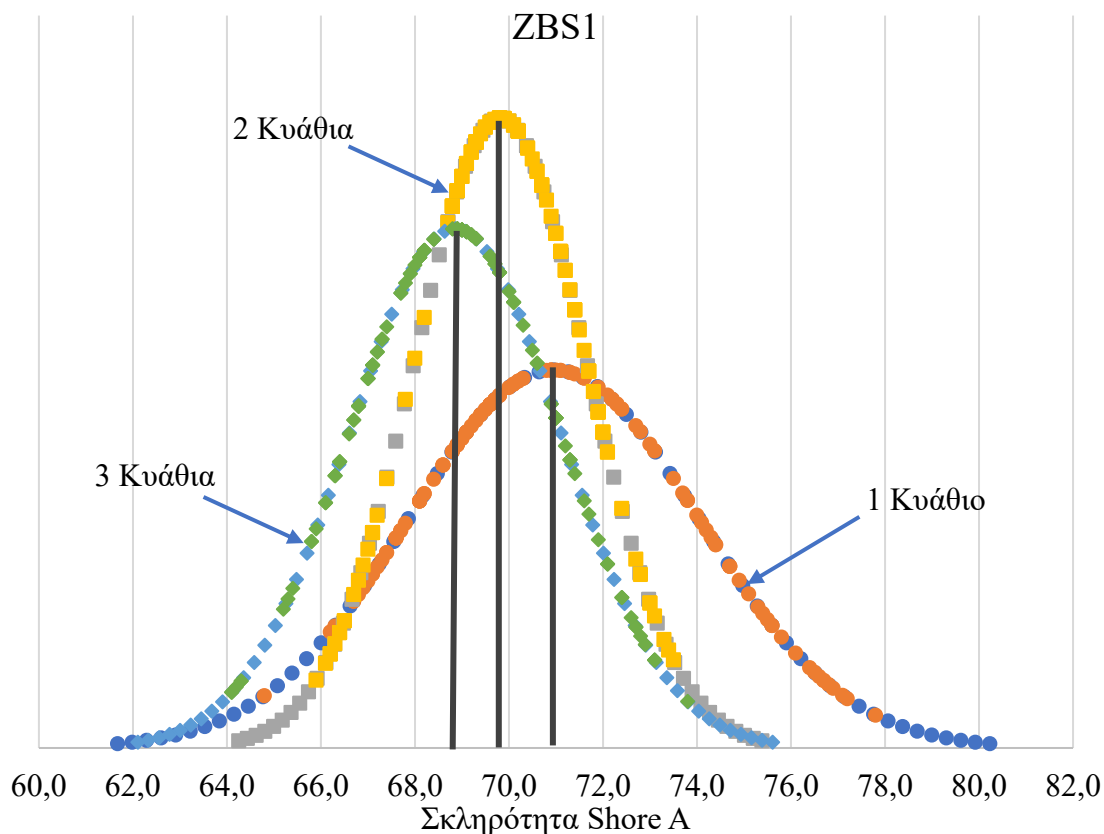
Σχήμα 3-27. Κανονικές κατανομές για τις μετρήσεις σκληρότητας Shore A στο μονωτήρα ZRS2N.



Σχήμα 3-28. Κανονικές κατανομές για τις μετρήσεις σκληρότητας Shore A στο μονωτήρα GNP4.



Σχήμα 3-29. Κανονικές κατανομές για τις μετρήσεις σκληρότητας Shore A στο μονωτήρα GNS3.



Σχήμα 3-30. Κανονικές κατανομές για τις μετρήσεις σκληρότητας Shore A στο μονωτήρα ZBS1.

Στα σχήματα 3-26 – 3-30 με σκούρες γκρι γραμμές συμβολίζονται οι αντίστοιχες μέσες τιμές των μετρήσεων. Από τα σχήματα αυτά φαίνεται ότι όταν η μέτρηση γίνεται σε ένα κυάθιο, η μέση τιμή είναι πιο μεγάλη από ότι όταν η μέτρηση γίνεται σε δύο ή τρία κυάθια. Αντίστοιχα, όταν η μέτρηση γίνεται σε δύο κυάθια, η μέση τιμή είναι μεγαλύτερη από ότι όταν γίνεται σε τρία κυάθια.

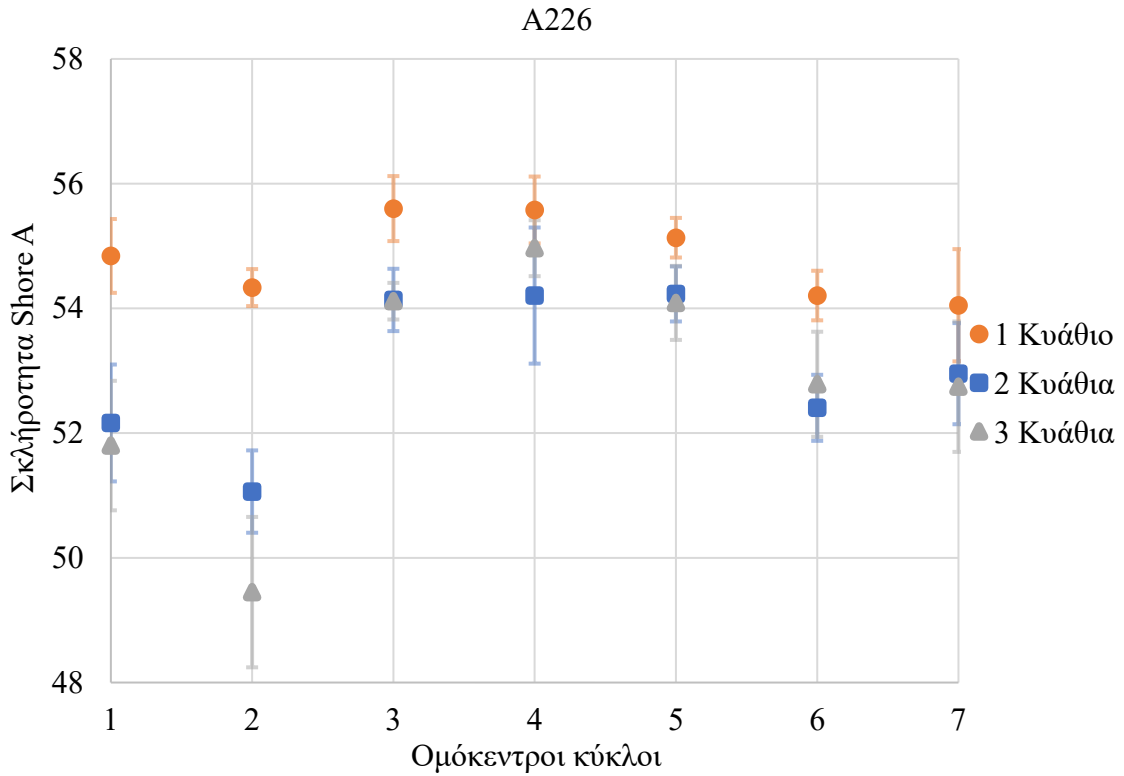
Η τυπική απόκλιση των μετρήσεων, όμως, φαίνεται να λειτουργεί αντίστροφα από τη μέση τιμή. Συγκεκριμένα, όταν αυξάνονται τα κυάθια φαίνεται ότι η τυπική απόκλιση των μετρήσεων αυξάνεται («φαρδαίνει» η καμπύλη της κατανομής). Μόνο στο σχήμα 3-30 φαίνεται η τυπική απόκλιση των μετρήσεων σε ένα κυάθιο να είναι μεγαλύτερη από ότι σε δύο και σε τρία κυάθια. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε ανομοιογενή γήρανση αυτού του κυαθίου κατά τη λειτουργία του μονωτήρα ZBS1 στο δίκτυο, δηλαδή σε άλλα σημεία του να είναι πολύ γηρασμένο το υλικό και να εμφανίζει μεγάλες τιμές σκληρότητας και σε άλλα λιγότερο γηρασμένο και έτσι να έχει μικρότερη σκληρότητα. Επίσης, το γεγονός ότι οι τυπικές αποκλίσεις των μετρήσεων σε δύο και τρία κυάθια είναι μεγαλύτερες από ότι σε ένα κυάθιο συμφωνεί και με την εμπειρία που αποκτήθηκε από αυτές τις μετρήσεις, καθώς το όργανο στερεωνόταν και μέτραγε πολύ καλύτερα σε ένα κυάθιο παρά σε δύο ή σε τρία

κυάθια. Η δυσκολία αυτή στερέωσης του οργάνου επάνω στα κυάθια προκύπτει από το γεγονός ότι η επιφάνεια των κυαθίων είναι εκ κατασκευής κεκλιμένη. Έτσι, ο χειριστής του οργάνου πρέπει ουσιαστικά να γέρνει το όργανο για να πραγματοποιήσει τη μέτρηση.

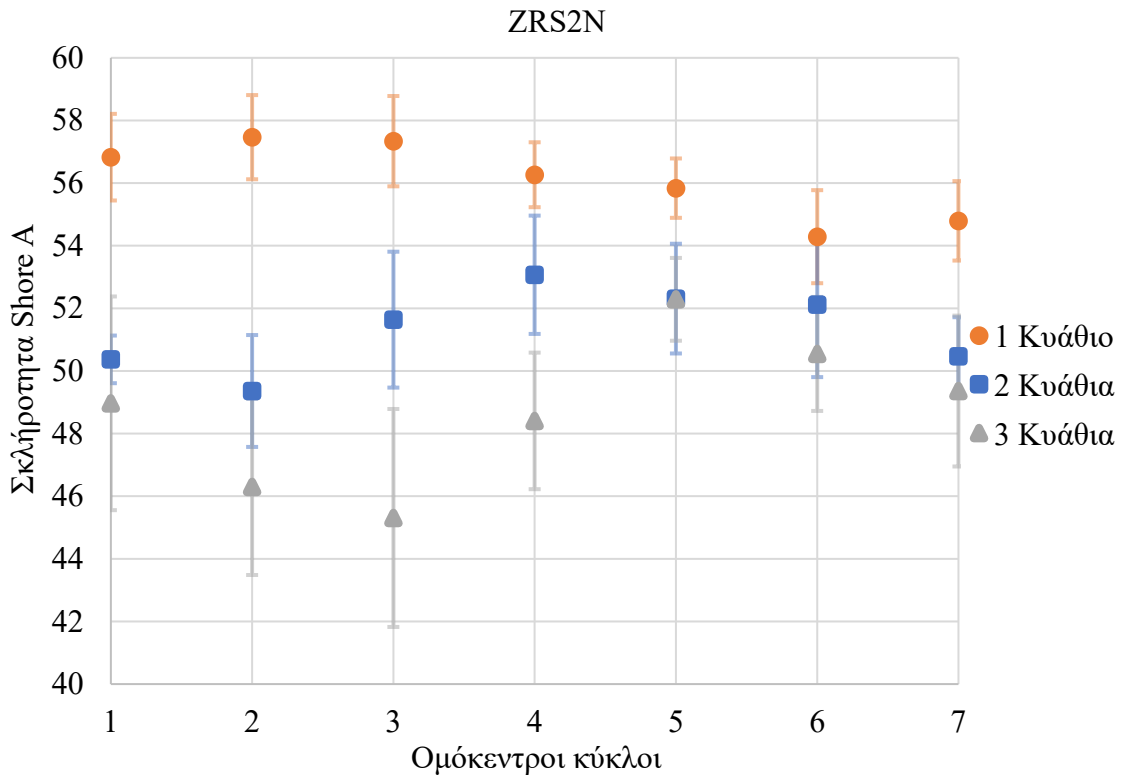
Το συμπέρασμα που προκύπτει τελικά είναι ότι για να πραγματοποιηθεί η μέτρηση της σκληρότητας στα κυάθια ενός συνθετικού μονωτήρα θα πρέπει να επιλεγεί σε πόσα κυάθια θα γίνει η μέτρηση. Αν η μέτρηση γίνει σε ένα κυάθιο (πάχος < 6 mm), η τιμή της σκληρότητας θα είναι πιο αυξημένη από ότι αν γίνει σε δύο κυάθια (πάχος > 6 mm), αλλά η τυπική απόκλιση μικρότερη και αντιστρόφως αν η μέτρηση γίνει σε δύο κυάθια τοποθετημένα το ένα επάνω στο άλλο. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψιν τη μεγάλη δυσκολία (σε πρακτικό επίπεδο) και τις μεγάλες τυπικές αποκλίσεις που εμφανίζει η μέτρηση σε τρία κυάθια το ένα επάνω στο άλλο (πάχος >> 6 mm), συνιστάται η μέτρηση αυτή να μην πραγματοποιείται σε τρία κυάθια.

3.4.1.2.3 Σημεία των κυαθίων στα οποία προτείνεται να γίνεται η μέτρηση

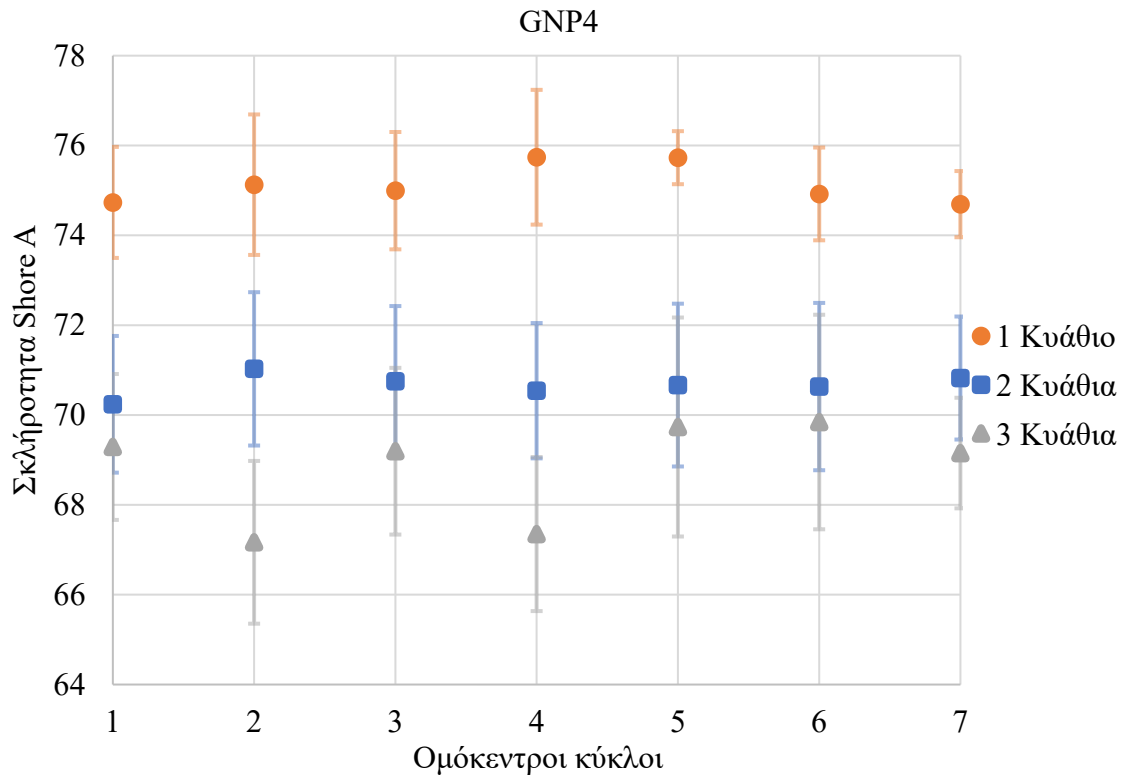
Από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στους μονωτήρες A226, ZRS2N, GNP4, GNS3 και ZBS1, ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 3.4.1.2.2, σχεδιάστηκαν τα σχήματα 3-31 έως 3-35. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των μετρήσεων για τον κάθε ομόκεντρο κύκλο για τις μετρήσεις που λήφθηκαν σε 1, 2 και 3 κυάθια το ένα επάνω στο άλλο και παρουσιάζονται στα σχήματα 3-31 έως 3-35. Από τα σχήματα αυτά (εκτός του 3-34 που είχε λιγότερες μετρήσεις) παρατηρείται ότι στα μεσαία σημεία (δηλαδή στους ομόκεντρους κύκλους 3, 4 και 5) οι μετρήσεις έχουν μικρότερες τυπικές αποκλίσεις από τις μετρήσεις στους άλλους κύκλους. Επίσης, η εμπειρία που αποκτήθηκε κατά τις μετρήσεις, έδειξε ότι το ψηφιακό σκληρόμετρο μετράει πιο καλά όταν πατάει επάνω στο κυάθιο όλη η επιφάνεια του. Αυτό μπορεί να εφαρμοστεί στους μεσαίους ομόκεντρους κύκλους κατά τη μέτρηση (3, 4 και 5), όπου η επιφάνεια του κυαθίου είναι αρκετή, ώστε το όργανο μέτρησης να έχει καλή εφαρμογή.



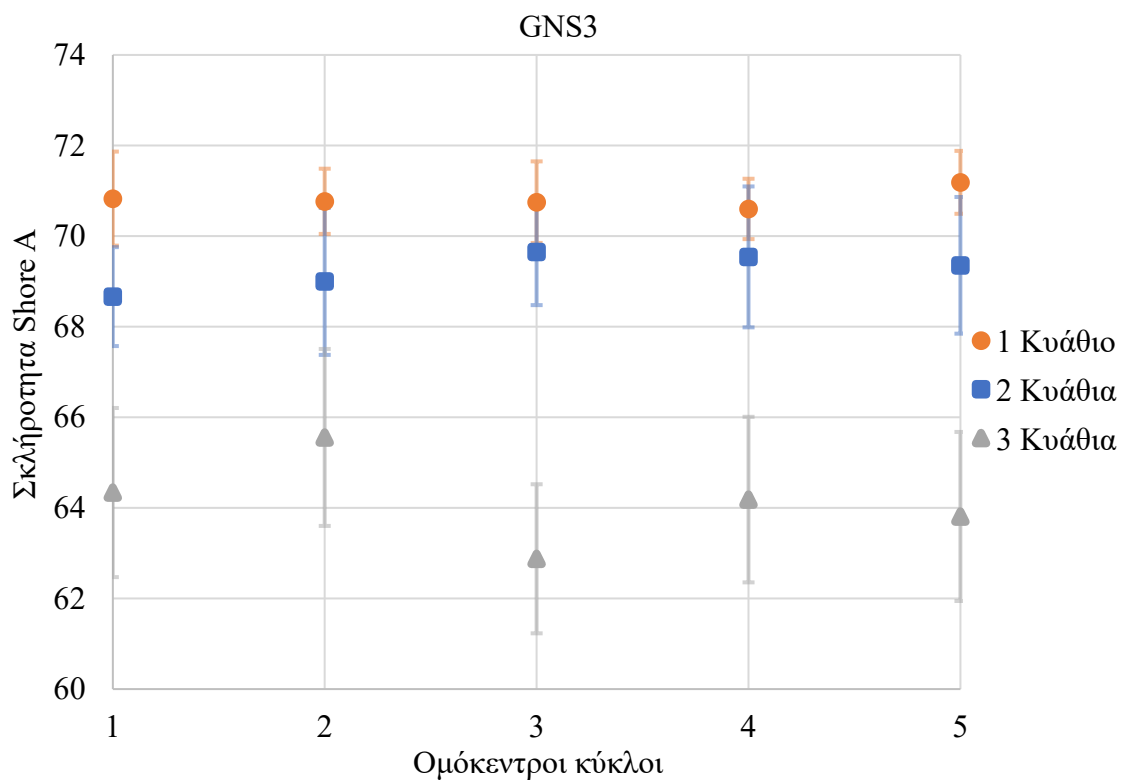
Σχήμα 3-31 Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις των μετρήσεων σκληρότητας Shore A στα κυάθια του καινούριου μονωτήρα A226.



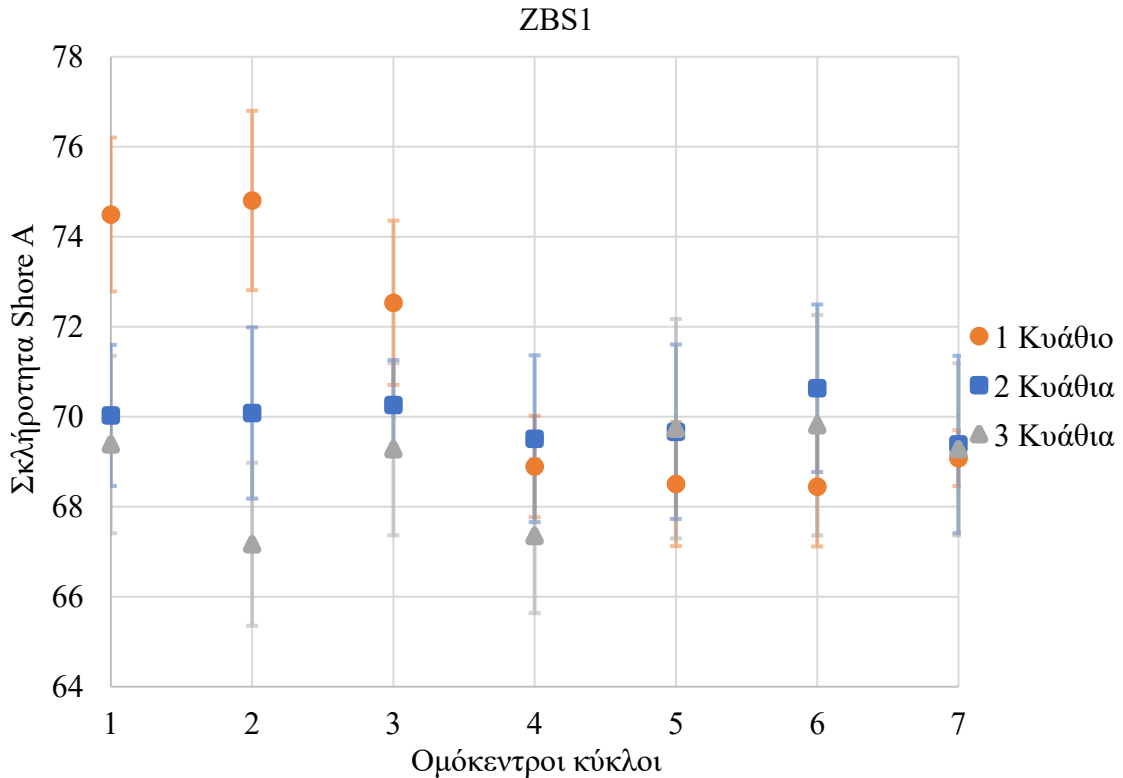
Σχήμα 3-32 Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις των μετρήσεων σκληρότητας Shore A στα κυάθια του καινούριου μονωτήρα ZRS2N.



Σχήμα 3-33 Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις των μετρήσεων σκληρότητας Shore A στα κιάθια του μεταχειρισμένου μονωτήρα GNP4 (με 9 χρόνια λειτουργίας στο δίκτυο).



Σχήμα 3-34 Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις των μετρήσεων σκληρότητας Shore A στα κιάθια του μεταχειρισμένου μονωτήρα GNS3 (με 4 χρόνια λειτουργίας στο δίκτυο).



Σχήμα 3-35 Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις των μετρήσεων σκληρότητας Shore A στα κυάθια του μεταχειρισμένου μονωτήρα ZBS1 (με 9 χρόνια λειτουργίας στο δίκτυο).

Έτσι, συνδυάζοντας την πρακτική εμπειρία και τα αποτελέσματα των μετρήσεων προτείνεται η μέτρηση αυτή να γίνεται στο μέσον των κυαθίων (στην επιφάνεια που ορίζεται από τους ομόκεντρους 3, 4 και 5). Επιπλέον, από τα σχήματα 3-31 έως 3-35 επαληθεύεται το συμπέρασμα του υποκεφαλαίου 3.4.1.2.1, ότι η μέτρηση της σκληρότητας Shore A μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ένας αρκετά καλός δείκτης της γήρανσης του υλικού των μονωτήρων, καθώς οι καινούριοι μονωτήρες A226 και ZRS2N έχουν χαμηλότερη σκληρότητα από τον μεταχειρισμένο GNS3 (4 χρόνια στο δίκτυο) και αυτός χαμηλότερη από τους GNP4 και ZBS1 (9 χρόνια στο δίκτυο).

3.4.1.2.4 Πρόταση υπολογισμού της αβεβαιότητας της μέτρησης σκληρότητας Shore A σε συνθετικούς μονωτήρες

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρατίθεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας της μέτρησης της σκληρότητας Shore A σε συνθετικούς μονωτήρες. Ουσιαστικά, μελετήθηκε το πως επηρεάζεται η αβεβαιότητα της μέτρησης αυτής στα κυάθια των συνθετικών μονωτήρων, όταν εφαρμόζονται διαφορετικοί τρόποι διεξαγωγής της μέτρησης. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίστηκε η αβεβαιότητα των

μετρήσεων εφαρμόζοντας 9 διαφορετικές διαδικασίες μέτρησης στα κυάθια του μονωτήρα A226. Οι διαδικασίες αυτές ήταν οι παρακάτω:

1. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε **ένα κυάθιο** του A226 (μη πληρώντας την απαίτηση του Προτύπου ISO 48-4 [59] για πάχος δοκιμίου τουλάχιστον 6 mm), σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 3.4.1.2.2, σε 18 σημεία που ήταν επάνω σε καθέναν από **7 ομόκεντρους κύκλους**, οι οποίοι ισαπέχον μεταξύ τους (126 μετρήσεις συνολικά). Αυτές οι μετρήσεις έγιναν από ένα άτομο και χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς της επαναληψιμότητας (εξηγείται στη συνέχεια). Επιπλέον, ελήφθησαν μετρήσεις, στο ίδιο κυάθιο του A226, σε 16 σημεία που ήταν επάνω σε καθέναν από 7 ομόκεντρους κύκλους (112 μετρήσεις συνολικά) από 8 επιπλέον άτομα. Το κάθε άτομο από αυτά πραγματοποίησε μέτρηση της σκληρότητας σε 2 τυχαία σημεία (από τα 18 συνολικά) του κάθε ομόκεντρου κύκλου (δηλαδή το κάθε άτομο έκανε $2 \times 7 = 14$ μετρήσεις). Αυτές οι μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς της αναπαραγωγιμότητας (εξηγείται στη συνέχεια).
2. Λαμβάνοντας υπόψιν τα συμπεράσματα του υποκεφαλαίου 3.4.1.2.3, ότι δηλαδή είναι καλύτερα η μέτρηση της σκληρότητας να γίνεται στο μέσον των κυαθίων των συνθετικών μονωτήρων και συγκεκριμένα στην περιοχή που ορίζουν οι **ομόκεντροι κύκλοι 3, 4 και 5**, ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με παραπάνω (περιγράφεται στο 1), αλλά λήφθηκαν υπόψιν μόνο οι μετρήσεις των ομόκεντρων κύκλων 3, 4 και 5. Δηλαδή, είχαμε 18 (σημεία) $\times 3$ (ομόκεντροι κύκλοι 3, 4 και 5) = 54 μετρήσεις για την επαναληψιμότητα και 16 (σημεία) $\times 3$ (ομόκεντροι κύκλοι 3, 4 και 5) = 48 μετρήσεις για την αναπαραγωγιμότητα. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν (όπως και στο 1 παραπάνω) σε **ένα κυάθιο** του A226.
3. Τοποθετήθηκαν **δύο κυάθια** του A226 το ένα επάνω στο άλλο (καλύπτοντας την απαίτηση του Προτύπου ISO 48-4 [59] για πάχος δοκιμίου τουλάχιστον 6 mm) και όλες οι μετρήσεις έγιναν στο επάνω κυάθιο. Ακολουθήθηκε ακριβώς η διαδικασία μετρήσεων που περιγράφηκε στην περίπτωση 1. Οι μετρήσεις έγιναν στους **7 ομόκεντρους κύκλους**.
4. Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις της περίπτωσης 3, αλλά μόνο για τους **3 ομόκεντρους κύκλους** 3, 4 και 5. Οι μετρήσεις, όπως και στην περίπτωση 3, ελήφθησαν σε **δύο κυάθια** του A226 τοποθετημένα το ένα επάνω στο άλλο.
5. Τοποθετήθηκαν **τρία κυάθια** του A226 το ένα επάνω στο άλλο (πάχος δοκιμίου $\gg 6$ mm) και όλες οι μετρήσεις έγιναν στο επάνω κυάθιο. Ακολουθήθηκε ακριβώς η

- διαδικασία μετρήσεων που περιγράφηκε στην περίπτωση 1. Οι μετρήσεις έγιναν στους **7 ομόκεντρους κύκλους**.
6. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις της περίπτωσης 5, αλλά μόνο για τους **3 ομόκεντρους κύκλους** 3, 4 και 5. Οι μετρήσεις όπως και στο 5 ελήφθησαν σε **τρία κυάθια** του A226 τοποθετημένα το ένα επάνω στο άλλο.
 7. Πραγματοποιήθηκε υπολογισμός της αβεβαιότητας για την περίπτωση που ακολουθείται η **διαδικασία του Προτύπου ISO 48-4** [59] για τη διεξαγωγή των μετρήσεων. Δηλαδή, ελήφθησαν 5 μετρήσεις για την επαναληψιμότητα (από ένα άτομο) και άλλες 5 μετρήσεις για την αναπαραγωγιμότητα (από επιπλέον 5 άτομα) σε **ένα κυάθιο** του A226 σε σημεία των **τριών μεσαίων ομόκεντρων κύκλων 3, 4 και 5**.
 8. Εκτελέστηκε πάλι η διαδικασία της περίπτωσης 7, **σύμφωνα με το Πρότυπο ISO 48-4** [59], μόνο που τώρα κάτω από το μετρούμενο κυάθιο, τοποθετήθηκε ακόμη ένα (καλύπτοντας την απαίτηση του Προτύπου ISO 48-4 [59] για πάχος δοκιμίου τουλάχιστον 6 mm). Δηλαδή οι μετρήσεις έγιναν στο επάνω κυάθιο από τα **δύο κυάθια** που ήταν τοποθετημένα το ένα επάνω στο άλλο και σε σημεία που ήταν επάνω στους **3 ομόκεντρους κύκλους** 3, 4 και 5.
 9. Τέλος, εκτελέστηκε η διαδικασία της περίπτωσης 7, **σύμφωνα με το Πρότυπο ISO 48-4** [59], αυτή τη φορά μετρώντας στο επάνω κυάθιο από **τρία κυάθια** τοποθετημένα το ένα επάνω στο άλλο (πάχος δοκιμίου $\gg 6$ mm) σε σημεία που ήταν επάνω στους **3 ομόκεντρους κύκλους** 3, 4 και 5.

Για τους υπολογισμούς των αβεβαιοτήτων ακολουθήθηκαν οι οδηγίες των βιβλιογραφικών πηγών [227] και [228]. Ο υπολογισμός της συνολικής αβεβαιότητας προκύπτει αφού πρώτα υπολογιστούν οι δύο συνιστώσες αυτής, η αβεβαιότητα τύπου A (U_A) και η αβεβαιότητα τύπου B (U_B).

Η αβεβαιότητα τύπου A υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψιν δύο συνιστώσες:

- Την επαναληψιμότητα ($U_{A1}(x_i)$), η οποία προέκυψε από μετρήσεις που λάμβανε ένα άτομο και
- την αναπαραγωγιμότητα ($U_{A2}(x_i)$), η οποία προέκυψε από μετρήσεις που λαμβάνονταν από πολλά διαφορετικά άτομα.

Η επαναληψιμότητα υπολογίστηκε σύμφωνα με την εξίσωση 3-1.

$$U_{A1}(x_{i1}) = \frac{\sigma_{A1}(x_{i1})}{\sqrt{n_{A1}}} = \sqrt{\frac{1}{n_{A1}*(n_{A1}-1)} * \sum_{i=1}^{n_{A1}} (x_{i1} - x_{m1})^2} \quad (3-1)$$

Όπου x_{i1} είναι η μετρούμενη τιμή που ελήφθησε για την επαναληψιμότητα, $\sigma_{A1}(x_i)$ είναι η τυπική απόκλιση του δείγματος των μετρήσεων επαναληψιμότητας, n_{A1} είναι το πλήθος των μετρήσεων επαναληψιμότητας και x_{m1} είναι η μέση τιμή των μετρήσεων επαναληψιμότητας.

Η αναπαραγωγιμότητα υπολογίστηκε σύμφωνα με την εξίσωση 3-2.

$$U_{A2}(x_{i2}) = \frac{\sigma_{A2}(x_{i2})}{\sqrt{n_{A2}}} = \sqrt{\frac{1}{n_{A2}*(n_{A2}-1)} * \sum_{i=1}^{n_{A2}} (x_{i2} - x_{m2})^2} \quad (3-2)$$

Όπου x_{i2} είναι η μετρούμενη τιμή που ελήφθησε για την αναπαραγωγιμότητα, $\sigma_{A2}(x_i)$ είναι η τυπική απόκλιση του δείγματος των μετρήσεων αναπαραγωγιμότητας, n_{A2} είναι το πλήθος των μετρήσεων αναπαραγωγιμότητας και x_{m2} είναι η μέση τιμή των μετρήσεων αναπαραγωγιμότητας.

Έπειτα, η συνδυασμένη αβεβαιότητα τύπου A υπολογίστηκε σύμφωνα με την εξίσωση 3-3.

$$U_A(y) = \sqrt{(U_{A1}(y))^2 + (U_{A2}(y))^2} = \sqrt{c_1^2 * \left(\frac{U_{A1}(x_{i1})}{k_1}\right)^2 + c_2^2 * \left(\frac{U_{A2}(x_{i2})}{k_2}\right)^2} \quad (3-3)$$

Όπου c_1, c_2 είναι οι συντελεστές ευαισθησίας της επαναληψιμότητας και της αναπαραγωγιμότητας αντίστοιχα, k_1, k_2 είναι οι συντελεστές κάλυψης (διαιρέτες) των κατανομών της επαναληψιμότητας και της αναπαραγωγιμότητας αντίστοιχα (για την επαναληψιμότητα και την αναπαραγωγιμότητα, για κανονική κατανομή, ισχύει $k_1 = k_2 = 1$ [227]).

Στη συνέχεια, υπολογίστηκε η συνδυασμένη αβεβαιότητα τύπου B σύμφωνα με την εξίσωση 3-4.

$$U_B(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (U_{Bi}(y))^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 * (U_{Bi}(x_i))^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 * \left(\frac{s_{Bi}}{k_i}\right)^2} \quad (3-4)$$

Όπου N είναι το πλήθος των παραγόντων που λαμβάνονται υπόψιν στον υπολογισμό της αβεβαιότητας τύπου B, c_i είναι οι αντίστοιχοι συντελεστές ευαισθησίας των παραγόντων

αυτών, s_{B_i} είναι η μέγιστη αβεβαιότητα που εισάγει ο παράγοντας i και k_i είναι ο συντελεστής κάλυψης της αντίστοιχης κατανομής.

Εν συνεχεία, υπολογίζεται η συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα σύμφωνα με την εξίσωση 3-5.

$$U_c(y) = \sqrt{(U_A(y))^2 + (U_B(y))^2} \quad (3-5)$$

Τέλος, υπολογίζεται η διευρυμένη αβεβαιότητα σύμφωνα με την εξίσωση 3-6.

$$U = k * U_c(y) \quad (3-6)$$

Όπου $k = 2$, για πιθανότητα κάλυψης (P) 95,45%, για την κανονική κατανομή.

Ακολουθώς, στους πίνακες 3-12 έως 3-20, παρατίθενται οι παράγοντες που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς των αβεβαιοτήτων και τα αποτελέσματά τους για τις προαναφερθείσες διαδικασίες μέτρησης 1 έως 9 αντίστοιχα.

Πίνακας 3-12. Υπολογισμός αβεβαιότητας για τη διαδικασία μέτρησης 1 (1 κύαθιο - 7 ομόκεντροι κύκλοι).

	Παράγων Αβεβαιότητας	Τιμή Αβεβαιότητας (σε μονάδες σκληρότητας Shore A)	Κατανομή	Συντελεστής Κάλυψης (Διαίρετης)	Συντελεστής Ευαισθησίας	Τυπική Αβεβαιότητα	Πηγή
Τύπου Α	Επαναληψιμότητα	0,07	Κανονική	1	1	0,07	Μετρήσεις από ένα άτομο
	Αναπαραγωγιμότητα	0,18	Κανονική	1	1	0,18	Μετρήσεις από οκτώ άτομα
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα τύπου Α						0,20	
Τύπου Β	Ανάγνωση οργάνου	0,50	Ορθογώνια	$\sqrt{3}$	1	0,29	Εγχειρίδιο χρήσης
	Αβεβαιότητα διακρίβωσης	2,00	Κανονική	2,00	1	1,00	Πιστοποιητικό διακρίβωσης
	Εφαρμογή του οργάνου επάνω στο δοκίμιο	1,20	Κανονική	2,00	1	0,60	Εργαστηριακή εμπειρία
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα τύπου Β						1,20	
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα						1,22	
Διευρυμένη αβεβαιότητα (k=2, P=95,45%, κανονική κατανομή)						2,44	

Πίνακας 3-13. Υπολογισμός αβεβαιότητας για τη διαδικασία μέτρησης 2 (1 κιάθιο - 3 ομόκεντροι κύκλοι).

	Παράγων Αβεβαιότητας	Τιμή Αβεβαιότητας (σε μονάδες σκληρότητας Shore A)	Κατανομή	Συντελεστής Κάλυψης (Διαιρέτης)	Συντελεστής Ευαισθησίας	Τυπική Αβεβαιότητα	Πηγή
Τύπου Α	Επαναληψιμότητα	0,07	Κανονική	1	1	0,07	Μετρήσεις από ένα άτομο
	Αναπαραγωγιμότητα	0,23	Κανονική	1	1	0,23	Μετρήσεις από οκτώ άτομα
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα τύπου Α						0,24	
Τύπου Β	Ανάγνωση οργάνου	0,50	Ορθογώνια	$\sqrt{3}$	1	0,29	Εγχειρίδιο χρήσης
	Αβεβαιότητα διακρίβωσης	2,00	Κανονική	2,00	1	1,00	Πιστοποιητικό διακρίβωσης
	Εφαρμογή του οργάνου επάνω στο δοκίμιο	1,00	Κανονική	2,00	1	0,50	Εργαστηριακή εμπειρία
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα τύπου Β						1,15	
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα						1,18	
Διευρυμένη αβεβαιότητα (k=2, P=95,45%, κανονική κατανομή)						2,36	

Πίνακας 3-14. Υπολογισμός αβεβαιότητας για τη διαδικασία μέτρησης 3 (2 κιάθια - 7 ομόκεντροι κύκλοι).

	Παράγων Αβεβαιότητας	Τιμή Αβεβαιότητας (σε μονάδες σκληρότητας Shore A)	Κατανομή	Συντελεστής Κάλυψης (Διαιρέτης)	Συντελεστής Ευαισθησίας	Τυπική Αβεβαιότητα	Πηγή
Τύπου Α	Επαναληψιμότητα	0,12	Κανονική	1	1	0,12	Μετρήσεις από ένα άτομο
	Αναπαραγωγιμότητα	0,18	Κανονική	1	1	0,18	Μετρήσεις από οκτώ άτομα
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα τύπου Α						0,22	
Τύπου Β	Ανάγνωση οργάνου	0,50	Ορθογώνια	$\sqrt{3}$	1	0,29	Εγχειρίδιο χρήσης
	Αβεβαιότητα διακρίβωσης	2,00	Κανονική	2,00	1	1,00	Πιστοποιητικό διακρίβωσης
	Εφαρμογή του οργάνου επάνω στο δοκίμιο	1,50	Κανονική	2,00	1	0,75	Εργαστηριακή εμπειρία
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα τύπου Β						1,28	
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα						1,30	
Διευρυμένη αβεβαιότητα (k=2, P=95,45%, κανονική κατανομή)						2,60	

Πίνακας 3-15. Υπολογισμός αβεβαιότητας για τη διαδικασία μέτρησης 4 (2 κιάθια - 3 ομόκεντροι κύκλοι).

	Παράγων Αβεβαιότητας	Τιμή Αβεβαιότητας (σε μονάδες σκληρότητας Shore A)	Κατανομή	Συντελεστής Κάλυψης (Διαιρέτης)	Συντελεστής Ευαισθησίας	Τυπική Αβεβαιότητα	Πηγή
Τύπου Α	Επαναληψιμότητα	0,10	Κανονική	1	1	0,10	Μετρήσεις από ένα άτομο
	Αναπαραγωγιμότητα	0,21	Κανονική	1	1	0,21	Μετρήσεις από οκτώ άτομα
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα τύπου Α						0,24	
Τύπου Β	Ανάγνωση οργάνου	0,50	Ορθογώνια	$\sqrt{3}$	1	0,29	Εγχειρίδιο χρήσης
	Αβεβαιότητα διακρίβωσης	2,00	Κανονική	2,00	1	1,00	Πιστοποιητικό διακρίβωσης
	Εφαρμογή του οργάνου επάνω στο δοκίμιο	1,30	Κανονική	2,00	1	0,65	Εργαστηριακή εμπειρία
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα τύπου Β						1,23	
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα						1,25	
Διευρυμένη αβεβαιότητα (k=2, P=95,45%, κανονική κατανομή)						2,50	

Πίνακας 3-16. Υπολογισμός αβεβαιότητας για τη διαδικασία μέτρησης 5 (3 κιάθια - 7 ομόκεντροι κύκλοι).

	Παράγων Αβεβαιότητας	Τιμή Αβεβαιότητας (σε μονάδες σκληρότητας Shore A)	Κατανομή	Συντελεστής Κάλυψης (Διαιρέτης)	Συντελεστής Ευαισθησίας	Τυπική Αβεβαιότητα	Πηγή
Τύπου Α	Επαναληψιμότητα	0,18	Κανονική	1	1	0,18	Μετρήσεις από ένα άτομο
	Αναπαραγωγιμότητα	0,20	Κανονική	1	1	0,20	Μετρήσεις από οκτώ άτομα
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα τύπου Α						0,26	
Τύπου Β	Ανάγνωση οργάνου	0,50	Ορθογώνια	$\sqrt{3}$	1	0,29	Εγχειρίδιο χρήσης
	Αβεβαιότητα διακρίβωσης	2,00	Κανονική	2,00	1	1,00	Πιστοποιητικό διακρίβωσης
	Εφαρμογή του οργάνου επάνω στο δοκίμιο	2,00	Κανονική	2,00	1	1,00	Εργαστηριακή εμπειρία
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα τύπου Β						1,44	
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα						1,47	
Διευρυμένη αβεβαιότητα (k=2, P=95,45%, κανονική κατανομή)						2,93	

Πίνακας 3-17. Υπολογισμός αβεβαιότητας για τη διαδικασία μέτρησης 6 (3 κιάθια - 3 ομόκεντροι κύκλοι).

	Παράγων Αβεβαιότητας	Τιμή Αβεβαιότητας (σε μονάδες σκληρότητας Shore A)	Κατανομή	Συντελεστής Κάλυψης (Διαιρέτης)	Συντελεστής Ευαισθησίας	Τυπική Αβεβαιότητα	Πηγή
Τύπου A	Επαναληψιμότητα	0,09	Κανονική	1	1	0,09	Μετρήσεις από ένα άτομο
	Αναπαραγωγιμότητα	0,24	Κανονική	1	1	0,24	Μετρήσεις από οκτώ άτομα
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα τύπου A						0,26	
Τύπου B	Ανάγνωση οργάνου	0,50	Ορθογώνια	$\sqrt{3}$	1	0,29	Εγχειρίδιο χρήσης
	Αβεβαιότητα διακρίβωσης	2,00	Κανονική	2,00	1	1,00	Πιστοποιητικό διακρίβωσης
	Εφαρμογή του οργάνου επάνω στο δοκίμιο	1,60	Κανονική	2,00	1	0,80	Εργαστηριακή εμπειρία
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα τύπου B						1,31	
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα						1,34	
Διευρυμένη αβεβαιότητα (k=2, P=95,45%, κανονική κατανομή)						2,68	

Πίνακας 3-18. Υπολογισμός αβεβαιότητας για τη διαδικασία μέτρησης 7 (1 κιάθιο - 3 ομόκεντροι κύκλοι – σύμφωνα με το Πρότυπο ISO 48-4 [59]).

	Παράγων Αβεβαιότητας	Τιμή Αβεβαιότητας (σε μονάδες σκληρότητας Shore A)	Κατανομή	Συντελεστής Κάλυψης (Διαιρέτης)	Συντελεστής Ευαισθησίας	Τυπική Αβεβαιότητα	Πηγή
Τύπου A	Επαναληψιμότητα	0,27	Κανονική	1	1	0,27	Μετρήσεις από ένα άτομο
	Αναπαραγωγιμότητα	0,27	Κανονική	1	1	0,27	Μετρήσεις από οκτώ άτομα
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα τύπου A						0,38	
Τύπου B	Ανάγνωση οργάνου	0,50	Ορθογώνια	$\sqrt{3}$	1	0,29	Εγχειρίδιο χρήσης
	Αβεβαιότητα διακρίβωσης	2,00	Κανονική	2,00	1	1,00	Πιστοποιητικό διακρίβωσης
	Εφαρμογή του οργάνου επάνω στο δοκίμιο	1,00	Κανονική	2,00	1	0,50	Εργαστηριακή εμπειρία
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα τύπου B						1,15	
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα						1,22	
Διευρυμένη αβεβαιότητα (k=2, P=95,45%, κανονική κατανομή)						2,43	

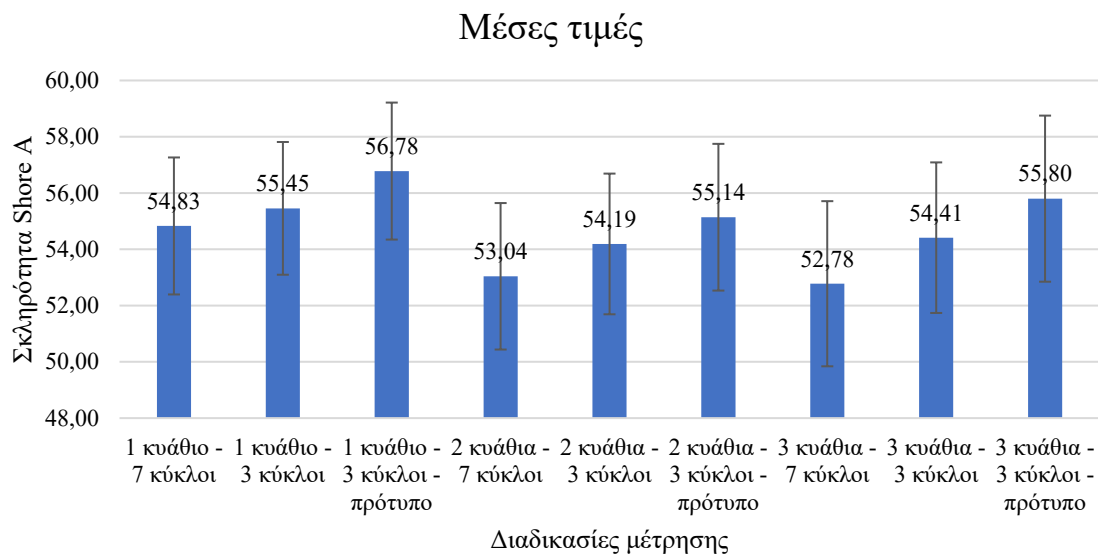
Πίνακας 3-19. Υπολογισμός αβεβαιότητας για τη διαδικασία μέτρησης 8 (2 κιάθια - 3 ομόκεντροι κύκλοι – σύμφωνα με το Πρότυπο ISO 48-4 [59]).

	Παράγων Αβεβαιότητας	Τιμή Αβεβαιότητας (σε μονάδες σκληρότητας Shore A)	Κατανομή	Συντελεστής Κάλυψης (Διαιρέτης)	Συντελεστής Ευαισθησίας	Τυπική Αβεβαιότητα	Πηγή
Τύπου A	Επαναληψιμότητα	0,20	Κανονική	1	1	0,20	Μετρήσεις από ένα άτομο
	Αναπαραγωγιμότητα	0,39	Κανονική	1	1	0,39	Μετρήσεις από οκτώ άτομα
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα τύπου A						0,44	
Τύπου B	Ανάγνωση οργάνου	0,50	Ορθογώνια	$\sqrt{3}$	1	0,29	Εγχειρίδιο χρήσης
	Αβεβαιότητα διακρίβωσης	2,00	Κανονική	2,00	1	1,00	Πιστοποιητικό διακρίβωσης
	Εφαρμογή του οργάνου επάνω στο δοκίμιο	1,30	Κανονική	2,00	1	0,65	Εργαστηριακή εμπειρία
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα τύπου B						1,23	
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα						1,30	
Διευρυμένη αβεβαιότητα (k=2, P=95,45%, κανονική κατανομή)						2,61	

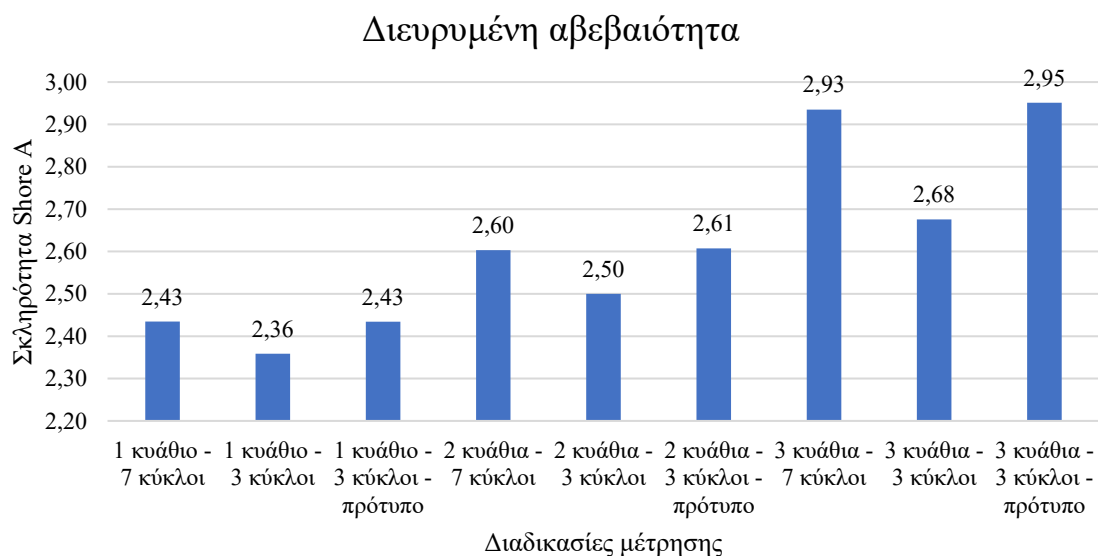
Πίνακας 3-20. Υπολογισμός αβεβαιότητας για τη διαδικασία μέτρησης 9 (3 κιάθια - 3 ομόκεντροι κύκλοι – σύμφωνα με το Πρότυπο ISO 48-4 [59]).

	Παράγων Αβεβαιότητας	Τιμή Αβεβαιότητας (σε μονάδες σκληρότητας Shore A)	Κατανομή	Συντελεστής Κάλυψης (Διαιρέτης)	Συντελεστής Ευαισθησίας	Τυπική Αβεβαιότητα	Πηγή
Τύπου A	Επαναληψιμότητα	0,34	Κανονική	1	1	0,34	Μετρήσεις από ένα άτομο
	Αναπαραγωγιμότητα	0,58	Κανονική	1	1	0,58	Μετρήσεις από οκτώ άτομα
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα τύπου A						0,67	
Τύπου B	Ανάγνωση οργάνου	0,50	Ορθογώνια	$\sqrt{3}$	1	0,29	Εγχειρίδιο χρήσης
	Αβεβαιότητα διακρίβωσης	2,00	Κανονική	2,00	1	1,00	Πιστοποιητικό διακρίβωσης
	Εφαρμογή του οργάνου επάνω στο δοκίμιο	1,60	Κανονική	2,00	1	0,80	Εργαστηριακή εμπειρία
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα τύπου B						1,31	
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα						1,48	
Διευρυμένη αβεβαιότητα (k=2, P=95,45%, κανονική κατανομή)						2,95	

Σημειώνεται εδώ, ότι στους πίνακες 3-12 έως 3-20 ο παράγοντας αβεβαιότητας «Εφαρμογή του οργάνου επάνω στο δοκίμιο» αναφέρεται στο πόσο καλά εφάρμοξε (πάταγε) το όργανο μέτρησης της σκληρότητας επάνω στα κύαθια του μονωτήρα. Οι τιμές αυτού του παράγοντα καθορίστηκαν από την εμπειρία που έχει αποκτηθεί κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων της σκληρότητας.



Σχήμα 3-36. Μέση τιμή των μετρήσεων για την κάθε διαδικασία μέτρησης της σκληρότητας Shore A.



Σχήμα 3-37. Διευρυμένη αβεβαιότητα για την κάθε διαδικασία μέτρησης της σκληρότητας Shore A.

Στο σχήμα 3-36 παρουσιάζονται με τις μπάρες οι μέσες τιμές των μετρήσεων που λήφθηκαν για τον υπολογισμό των αβεβαιοτήτων και με τις μπάρες σφάλματος (error bars) οι αντίστοιχες διευρυμένες αβεβαιότητες των μετρήσεων για την κάθε μία διαδικασία μέτρησης. Από το σχήμα 3-36 φαίνεται ότι καθώς αυξάνουμε το πάχος του δοκιμίου

(προσθέτοντας κυάθια το ένα επάνω στο άλλο), μειώνεται η μέση τιμή της σκληρότητας των κυαθίων. Επίσης, παρατηρούμε ότι όταν ακολουθούμε τη διαδικασία μέτρησης του Προτύπου ISO 48-4 [59] (διαδικασίες μέτρησης 7, 8, 9) λαμβάνοντας τη μέση τιμή μόνο 5 μετρήσεων επάνω στο κυάθιο, οι τιμές των μέσων τιμών που προκύπτουν είναι ελαφρώς πιο αυξημένες σε σχέση με τις μέσες τιμές που προκύπτουν από τις πολλές μετρήσεις των υπόλοιπων διαδικασιών μέτρησης (1 – 6).

Επίσης, από το σχήμα 3-37 παρατηρούμε ότι όταν επιλέγουμε να μετρήσουμε στην περιοχή των κυαθίων που ορίζεται από τους 3 ομόκεντρους κύκλους 3, 4 και 5, τότε η αβεβαιότητα των μετρήσεων είναι μειωμένη σε σχέση με όταν έχουμε μετρήσεις και από τους 7 ομόκεντρους κύκλους. Στη συνέχεια, για τις μετρήσεις σύμφωνα με το Πρότυπο ISO 48-4 [59] παρατηρούμε ότι η αβεβαιότητα αυξάνεται σε σχέση με τις περιπτώσεις των πολλών μετρήσεων στην περιοχή των ομόκεντρων κύκλων 3, 4 και 5, αλλά παραμένει ίδια με τις περιπτώσεις των πολλών μετρήσεων στους 7 ομόκεντρους κύκλους. Επίσης, από το σχήμα 3-37 παρατηρούμε ότι όταν προστίθενται επιπλέον κυάθια για τη μέτρηση, τότε η αβεβαιότητα της μέτρησης αυξάνεται.

Συμπερασματικά, από όλα τα παραπάνω φαίνεται ότι για να γίνουν αξιόπιστες μετρήσεις σκληρότητας Shore A στα κυάθια των συνθετικών μονωτήρων, θα πρέπει να βρεθεί η χρυσή τομή μεταξύ των: πόσων κυαθίων θα χρησιμοποιηθούν (το ένα επάνω στο άλλο), ώστε να καλύπτεται η απαίτηση του Προτύπου ISO 48-4 [59] που λέει για πάχος δοκιμίου τουλάχιστον 6 mm, πόσων μετρήσεων θα ληφθούν επάνω στα κυάθια, και σε ποια περιοχή των κυαθίων θα πρέπει να ληφθούν οι μετρήσεις. Από τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης προτείνεται οι μετρήσεις να γίνονται στην περιοχή που ορίζουν οι ομόκεντροι κύκλοι 3, 4, 5 (δηλαδή στη μεσαία περιοχή των κυαθίων), ώστε να μειώνεται, κατά το δυνατόν, η αβεβαιότητα της μέτρησης. Επίσης, προτείνεται οι μετρήσεις να γίνονται σύμφωνα με τη διαδικασία του Προτύπου ISO 48-4 [59], όσον αφορά το πλήθος τους (δηλαδή να λαμβάνονται 5 μετρήσεις και να υπολογίζεται η μέση τιμή τους), ώστε να είναι μικρός ο χρόνος ολοκλήρωσης της μέτρησης και τέλος προτείνεται η μέτρηση να γίνεται σε ένα κυάθιο, ώστε να μειώνεται ο χρόνος της μέτρησης (κοπή ενός μόνο κυαθίου από το μονωτήρα), αλλά να μειώνεται και η αβεβαιότητα της μέτρησης, λαμβάνοντας φυσικά υπόψιν ότι η τιμή της σκληρότητας που θα προκύπτει από αυτή τη διαδικασία (διαδικασία μέτρησης 7, από τις προαναφερθείσες) θα είναι λίγο πιο αυξημένη από την πραγματική.

Με αυτόν τον τρόπο η μέτρηση αυτή μπορεί να γίνει εύκολα, με ικανοποιητική ακρίβεια και σε ελάχιστο χρόνο.

3.4.1.3 Δοκιμή προσδιορισμού της πυκνότητας

Στους μονωτήρες που συλλέχθηκαν στο πλαίσιο αυτής της διδακτορικής διατριβής πραγματοποιήθηκε μέτρηση της πυκνότητας του μονωτικού περιβλήματος τους, το οποίο όπως έχει ήδη αναφερθεί, ήταν HTV silicone rubber με πρόσμιξη ATH (σύμφωνα με τις προδιαγραφές των κατασκευαστών τους). Για τη μέτρηση της πυκνότητας ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 2.2.1.3 της παρούσης ενδιάμεσης κρίσης. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν και η **μέθοδος Α** και η **μέθοδος Β** του Προτύπου ISO 2781, έτσι ώστε να διαφανεί ποια από τις δύο μεθόδους είναι πιο εύκολα εφαρμόσιμη, αλλά και ποια δίνει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα [75].

Κατά την εφαρμογή των δύο παραπάνω μεθόδων μέτρησης της πυκνότητας, υπήρχε μεγάλο πρόβλημα με τις φυσαλίδες που δημιουργούνται κατά τη βύθιση του υλικού στο νερό για μέτρηση της μάζας του. Γι' αυτό το λόγο, στο απιονισμένο νερό που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις τοποθετήθηκαν (κάθε φορά) 2 σταγόνες (0,16 ml) από Triton X – 100 (σχήμα 3-38), το οποίο βοηθάει στη μείωση της επιφανειακής τάσης του νερού (surface tension) και κατά συνέπεια δε δημιουργούνται φυσαλίδες στο δοκίμιο. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται το σφάλμα της μέτρησης.

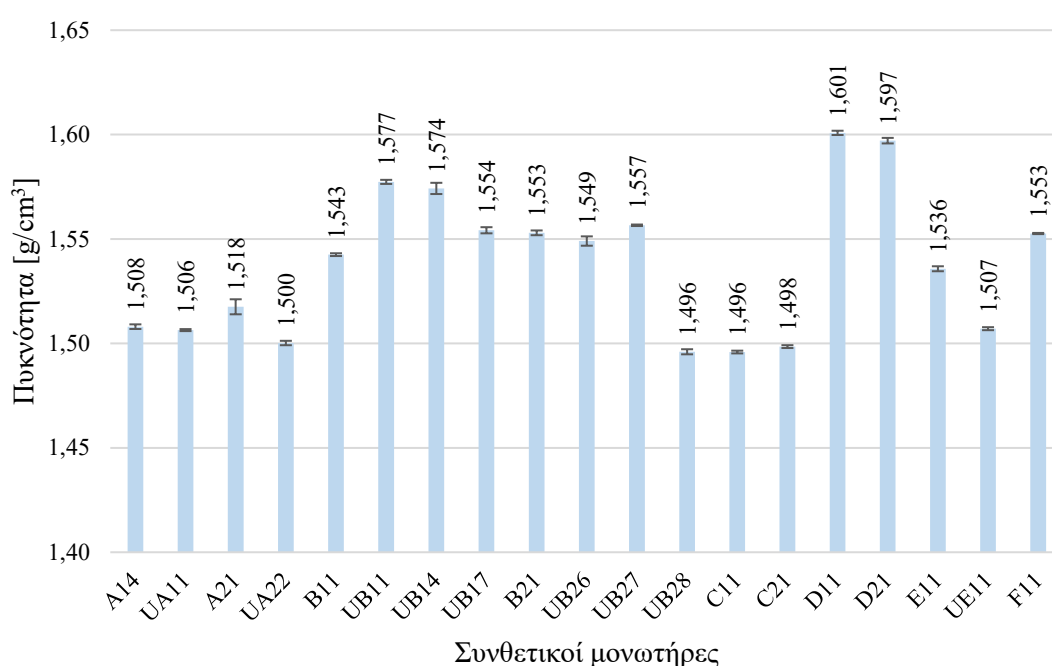


Σχήμα 3-38. Προσθήκη Triton – X 100 στο απιονισμένο νερό της μέτρησης ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο της δημιουργίας φυσαλίδων στο υπό μέτρηση δοκίμιο.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η μέτρηση της πυκνότητας στους συνθετικούς μονωτήρες σύμφωνα με τη **μέθοδο Α** του Προτύπου ISO 2781 [75], όπου χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση 2-1 για τους υπολογισμούς. Η ζυγαριά που χρησιμοποιήθηκε σε αυτές τις μετρήσεις ήταν η Kern PLT 2000 3DM με ακρίβεια ± 1 mg. Οι μετρήσεις πυκνότητας πραγματοποιήθηκαν σε έναν καινούριο μονωτήρα από κάθε κατασκευαστή και από κάθε τύπο και σε έναν

μεταχειρισμένο μονωτήρα από κάθε χρωματική ομάδα των πινάκων 3-5 και 3-6. Λήφθηκαν 3 μετρήσεις της πυκνότητας από τυχαία σημεία του μονωτικού περιβλήματος του κάθε μονωτήρα και υπολογίστηκε η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση τους. Η θερμοκρασία του απιονισμένου νερού κατά τις μετρήσεις ήταν πάντα 21 °C και η πυκνότητα του ρ_w λαμβανόταν ίση με 0,997989 g/cm³ στους υπολογισμούς της εξίσωσης 2-1 [229].

Οι μετρήσεις της πυκνότητας για τους καινούριους και τους μεταχειρισμένους συνθετικούς μονωτήρες φαίνονται στο σχήμα 3-39.



Σχήμα 3-39. Μέση τιμή των μετρήσεων της πυκνότητας και τυπικές αποκλίσεις αυτών για τους καινούριους και τους μεταχειρισμένους συνθετικούς μονωτήρες σύμφωνα με τη μέθοδο A του ISO 2781 [75].

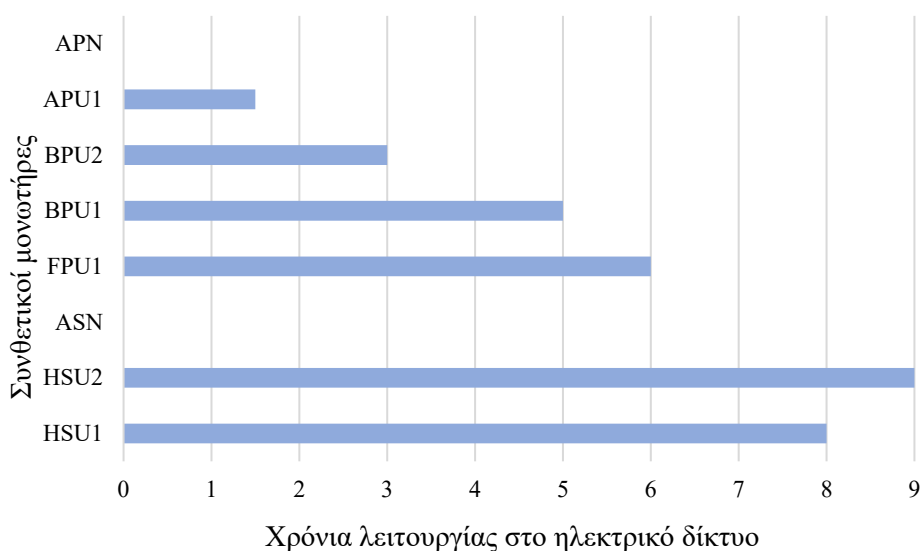
Αρχικά, από το σχήμα 3-39 παρατηρούμε ότι η πυκνότητα του μονωτικού περιβλήματος όλων των κατασκευαστών είναι μεγαλύτερη και σε κάποιες περιπτώσεις ίση με 1,5 g/cm³, γεγονός το οποίο, όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 2.2.1.3, είναι ένδειξη ότι το υλικό είναι HTV silicone rubber με πρόσμιξη ATH. Επίσης, συγκρίνοντας καινούριους και μεταχειρισμένους μονωτήρες ίδιων κατασκευαστών παρατηρούμε ότι οι τιμές της πυκνότητας είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους, γεγονός που σημαίνει ότι η μέτρηση της πυκνότητας του μονωτικού περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων δεν επηρεάζεται από τη γήρανση τους. Επιπλέον, παρατηρούνται κάποιες διαφορές στις μετρήσεις της πυκνότητας των καινούριων μονωτήρων διαφορετικών κατασκευαστών, οι οποίες πιθανόν

οφείλονται σε διαφορετική συγκέντρωση των υλικών και των προσμίξεων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του μονωτικού περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων. Επιπρόσθετα, οι πολύ μικρές τυπικές αποκλίσεις των μετρήσεων υποδηλώνουν ότι η μέθοδος Α του Προτύπου ISO 2781 [75] είναι αρκετά ακριβής. Τέλος, από την εμπειρία που αποκτήθηκε κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων αυτών διαπιστώθηκε ότι η μέτρηση της πυκνότητας με τη μέθοδο Α του Προτύπου ISO 2781 [75] είναι πολύ εύκολη και γρήγορη μέθοδος που δεν απαιτεί πολύ κόπο για να πραγματοποιηθεί.

Στη συνέχεια, στο πλαίσιο αυτής της διδακτορικής διατριβής πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της πυκνότητας του μονωτικού περιβλήματος συνθετικών μονωτήρων σύμφωνα με τη **μέθοδο Β** του Προτύπου ISO 2781 [75], όπως αυτή περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 2.2.1.3 της παρούσης διατριβής. Η ζυγαριά που χρησιμοποιήθηκε σε αυτές τις μετρήσεις ήταν η Kern EWJ 300-3H με ακρίβεια ± 1 mg. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν ώστε να διαπιστωθεί αν τα αποτελέσματα που δίνει η μέθοδος Β είναι ακριβή και πόσο εύκολο είναι να εφαρμόζεται αυτή η μέθοδος σε συνθετικούς μονωτήρες [230, 231].

Οι μονωτήρες που χρησιμοποιήθηκαν για αυτές τις μετρήσεις συλλέχθηκαν μόνο για αυτές και δε συμμετείχαν στο γενικό πρόγραμμα δοκιμών που πραγματοποιήθηκε σε αυτή τη διδακτορική διατριβή. Οι μονωτήρες που συλλέχθηκαν ήταν διάφορων κατασκευαστών (ο κατασκευαστής συμβολίζεται με το πρώτο γράμμα στην κωδική ονομασία που υιοθετήθηκε για αυτούς), δύο τύπων (ανάρτησης \rightarrow συμβολίζεται με το γράμμα S αμέσως μετά το γράμμα που αντιστοιχεί στον κατασκευαστή και στήριξης \rightarrow συμβολίζεται με το γράμμα P αμέσως μετά το γράμμα που αντιστοιχεί στον κατασκευαστή), καινούριοι (συμβολίζονται με το γράμμα N αμέσως μετά το γράμμα που αντιστοιχεί στον τύπο) και μεταχειρισμένοι (συμβολίζονται με το γράμμα U αμέσως μετά το γράμμα που αντιστοιχεί στον τύπο). Στο τέλος της κωδικής ονομασίας τους μπαίνει ο αύξων αριθμός τους όπου υπάρχουν περισσότεροι από ένας μονωτήρες. Οι μονωτήρες αυτοί συλλέχθηκαν από τις αποθήκες του ΔΕΔΔΗΕ (οι καινούριοι) και από το ηλεκτρικό δίκτυο του ΔΕΔΔΗΕ (οι μεταχειρισμένοι). Ήταν όλοι κατασκευασμένοι για χρήση σε μέση τάση 24 kV και το υλικό του μονωτικού περιβλήματος τους ήταν το HTV silicone rubber με πρόσμιξη ATH. Οι μονωτήρες αυτοί ήταν τεσσάρων κατασκευαστών εκ των οποίων οι τρεις (A, B, F) είναι οι ίδιοι κατασκευαστές με αυτούς των μονωτήρων που συλλέχθηκαν για αυτή τη διατριβή (πίνακας 3-1). Ο κατασκευαστής H δεν έχει ξαναχρησιμοποιηθεί σε αυτή τη διατριβή. Στο

σχήμα 3-40 παρουσιάζονται οι μονωτήρες που χρησιμοποιήθηκαν για αυτές τις μετρήσεις, καθώς και τα χρόνια λειτουργίας τους στο ηλεκτρικό δίκτυο του ΔΕΔΔΗΕ.

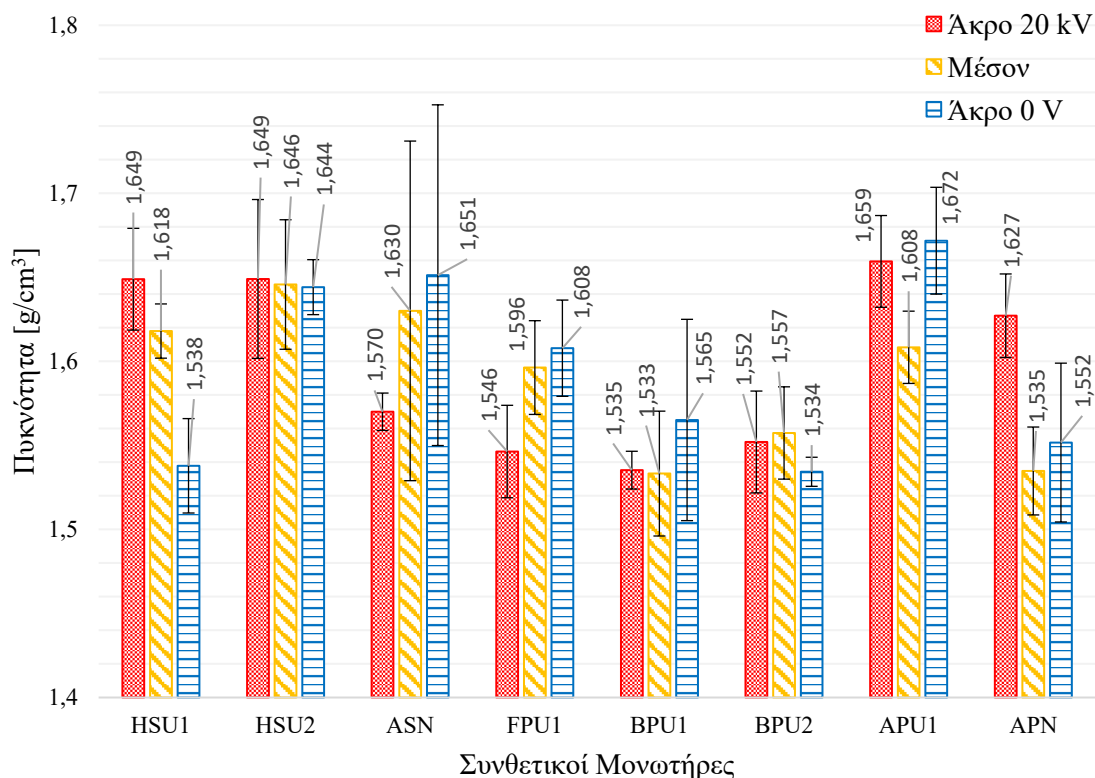


Σχήμα 3-40. Συνθετικοί μονωτήρες που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις πυκνότητας σύμφωνα με τη μέθοδο Β του ISO 2781 [75] και τα χρόνια λειτουργίας τους στο δίκτυο του ΔΕΔΔΗΕ.

Για τους σκοπούς αυτής της μελέτης πραγματοποιήθηκαν 3 μετρήσεις της πυκνότητας (σύμφωνα με την εξίσωση 2-2) στο κυάθιο του μονωτήρα που είναι κοντά στα 20 kV, 3 στο μεσαίο κυάθιο και 3 στο άκρο που είναι κοντά στα 0 V και κατόπιν υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές τους και οι τυπικές αποκλίσεις. Αυτό έγινε για τον κάθε μονωτήρα, ώστε να διαφανεί αν υπάρχουν διαφοροποιήσεις στις τιμές της πυκνότητας ανάλογα με το από ποιο σημείο του μονωτήρα λαμβάνονται τα δοκίμια για τις μετρήσεις. Το απιονισμένο νερό που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις είχε θερμοκρασία 21 °C και η πυκνότητα του ρ_w λαμβανόταν ίση με 0,997989 g/cm³ στους υπολογισμούς της εξίσωσης 2-2 [229].

Στο σχήμα 3-41 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων πυκνότητας σύμφωνα με τη μέθοδο Β του ISO 2781 [75]. Αυτό που φαίνεται από το σχήμα 3-41 είναι ότι οι μετρήσεις έχουν μεγάλες τυπικές αποκλίσεις, πράγμα που οφείλεται στη δυσκολία πραγματοποίησης αυτής της μέτρησης με τη μέθοδο Β. Από το σχήμα αυτό φαίνεται επίσης ότι οι μετρήσεις πυκνότητας σε ένα συνθετικό μονωτήρα δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από το σημείο του από το οποίο θα ληφθούν τα δοκίμια. Οι τιμές της πυκνότητας και εδώ, όπως και στο σχήμα 3-39, είναι μεγαλύτερες από 1,5 g/cm³, γεγονός που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν επαλήθευση ότι το υλικό είναι HTV silicone rubber με πρόσμιξη ATH. Επίσης, από την εμπειρία που αποκτήθηκε από την εκτέλεση αυτών των μετρήσεων συμπεραίνεται ότι η δοκιμή αυτή είναι πολύ κουραστική και χρονοβόρα. Επομένως, η

μέθοδος Β του Προτύπου ISO 2781 [75] δε συνιστάται να εφαρμόζεται σε συνθετικούς μονωτήρες, λόγω της μη ακρίβειας των αποτελεσμάτων της και της δυσκολίας εκτέλεσης της.



Σχήμα 3-41. Μετρήσεις της πυκνότητας σύμφωνα με τη μέθοδο Β του ISO 2781 [75] σε δοκίμια που λήφθηκαν από τρία μέρη των μονωτήρων και οι τυπικές αποκλίσεις των μετρήσεων αυτών.

3.4.1.4 Δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου (*Inclined plane test*)

3.4.1.4.1 Δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου σε καινούριους και μεταχειρισμένους συνθετικούς μονωτήρες

Οι συνθετικοί μονωτήρες που συλλέχθηκαν για τους σκοπούς του συγκριμένου διδακτορικού υποβλήθηκαν επίσης στη δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο υποκεφάλαιο 2.2.1.4, η δοκιμή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διαφανεί αν το μονωτικό περίβλημα που χρησιμοποιεί ο εκάστοτε κατασκευαστής είναι ανθεκτικό στο φαινόμενο της δημιουργίας αγωγίμων οδύσεων άνθρακα και στη διάβρωση (*tracking and erosion*). Ουσιαστικά, η δοκιμή αυτή αποτελεί ένα δείκτη για το εάν περιλαμβάνεται στο μονωτικό περίβλημα η κατάλληλη ποσότητα από το πληρωτικό υλικό ΑΤΗ (*aluminium - trihydrate*), αλλά και εάν τα σωματίδια του υλικού αυτού έχουν το κατάλληλο μέγεθος.

Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 2.2.1.4 της παρούσης διατριβής και εκτελέστηκε σύμφωνα με τη μέθοδο 1 του Προτύπου IEC 60587, με σταθερή AC τάση στα 4,5 kV για 6 ώρες συνεχόμενα [84]. Επίσης, το ρυπαντικό διάλυμα που χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή αυτή αποτελούταν από 0,1 % \pm 0,002 % κατά βάρος χλωριούχο αμμώνιο (NH_4Cl : ammonium chloride), από 0,02 % \pm 0,002 % κατά βάρος Triton X-100 και το υπόλοιπο μέρος από απιονισμένο νερό και πληρούσε τις προδιαγραφές του Προτύπου IEC 60587 [84]. Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των δοκιμών ήταν της εταιρίας Alpha Tec Medientechnik GmbH. Ως κριτήριο για την επιτυχία ή αποτυχία των δοκιμών σε αυτή τη δοκιμή χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο A του προτύπου IEC 60587 [84], δηλαδή ένα δοκίμιο αποτύγχανε εάν: είτε το ρεύμα διαρροής ξεπερνούσε τα 60 mA (για χρόνο μεγαλύτερο ίσο των 2 s), είτε εάν δημιουργούταν τρύπα στο δοκίμιο. Επίσης, το αποτέλεσμα της δοκιμής θεωρείτο επιτυχές μονάχα εάν και τα 5 δοκίμια (του ίδιου υλικού, δηλαδή από τον ίδιο μονωτήρα) επιτύγχαναν στη δοκιμή. Εάν τουλάχιστον ένα από αυτά αποτύγχανε, τότε το αποτέλεσμα ήταν ανεπιτυχές.

Ένα σημαντικό πρόβλημα της δοκιμής αυτής είναι ότι το Πρότυπο IEC 60587 [84] περιγράφει την εκτέλεση της σε δοκίμια που παρασκευάζονται αποκλειστικά για την πραγματοποίησή της (με συγκεκριμένες διαστάσεις και πάχος 6 mm). Έτσι, όταν η δοκιμή αυτή πρέπει να εκτελεστεί σε μονωτήρες (τελικά προϊόντα), είναι αδύνατον να έχουμε τα δοκίμια που απαιτούνται από το Πρότυπο IEC 60587 [84], αναφορικά με τις διαστάσεις, το σχήμα και το πάχος τους, καθώς τα δοκίμια θα πρέπει να αφαιρεθούν (κοπούν με μαχαίρι) από το μονωτήρα. Επομένως αναγκαστικά, γίνεται μια παρέκκλιση από τη διαδικασία του προτύπου σχετικά με την προετοιμασία των δοκιμών (διαφορετικό πάχος και διαστάσεις από αυτές που προδιαγράφει το Πρότυπο IEC 60587 [84]). Στη συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή επιλέχθηκε τα δοκίμια να είναι μισά κυάθια από τους μονωτήρες προς εξέταση και καθώς το πρότυπο απαιτεί 5 δοκίμια, απαιτήθηκαν 5 μισά κυάθια από τον κάθε μονωτήρα που δοκιμάστηκε.

Επίσης, ακόμα μία πρόσθετη διαδικασία η οποία υιοθετήθηκε στη συγκεκριμένη διατριβή για τη δοκιμή του κεκλιμένου επιπέδου και η οποία δεν υπάρχει στο Πρότυπο IEC 60587 [84], ήταν το υλικό των μονωτήρων να δοκιμάζεται και μετά από καταπόνηση 42 ωρών σε βρασμό σε κατάλληλο δοχείο από ανοξείδωτο ατσάλι (σχήμα 3-20) μέσα σε διάλυμα απιονισμένου νερού με 0,1% κατά βάρος χλωριούχο νάτριο (NaCl). Με αυτόν τον τρόπο

εφαρμόζεται επιταχυνόμενη τεχνητή γήρανση στο υλικό των κυαθίων και μπορούμε να έχουμε αποτελέσματα για το πως αντιδρά το υλικό μετά από καταπόνηση.

Τα δοκίμια για την πραγματοποίηση της δοκιμής του κεκλιμένου επιπέδου λήφθηκαν από έναν καινούριο μονωτήρα από κάθε κατασκευαστή και από κάθε τύπο και από ένα μεταχειρισμένο μονωτήρα από κάθε χρωματική ομάδα των πινάκων 3-5 και 3-6. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε: α) σε διαφορετικά μισά κυάθια των μονωτήρων **πριν** την προαναφερθείσα διαδικασία τεχνητής γήρανσης (βρασμό) και β) σε διαφορετικά μισά κυάθια **μετά** το βρασμό.

Για την προσαρμογή των δοκιμών επάνω στις πλαστικές βάσεις με τα μεταλλικά ηλεκτρόδια έγιναν τρύπες σε κατάλληλα σημεία των μισών κυαθίων. Στη συνέχεια, μετρήθηκε το πάχος και η μάζα τους πριν τη δοκιμή και τα δοκίμια προσαρμόζονταν στις πλαστικές βάσεις, όπου τοποθετούνταν επίσης και τα μεταλλικά ηλεκτρόδια και το χάρτινο φίλτρο, όπως φαίνεται στο σχήμα 3-42 (α). Επίσης, για την περίπτωση που τα δοκίμια υποβάλλονταν σε βρασμό, ζυγίζονταν και πριν και μετά το βρασμό.

Έπειτα, τα 5 δοκίμια προσαρμόζονταν στη συσκευή του κεκλιμένου επιπέδου (σχήμα 3-42 (β)), τοποθετούνταν τα λαστιγάκια με το ρυπαντικό υγρό, στο χάρτινο φίλτρο του καθενός και ξεκίναγε η δοκιμή στα 4,5 kV για 6 ώρες (σχήμα 3-43). Μετά το τέλος της δοκιμής τα δοκίμια ζυγίζονταν ξανά και αφού καθαρίζονταν με ισοπροπυλική αλκοόλη, μετρούνταν: το μέγιστο μήκος, πλάτος και βάθος της διάβρωσης που προέκυπτε στο υλικό λόγω της καταπόνησης από τη δοκιμή.

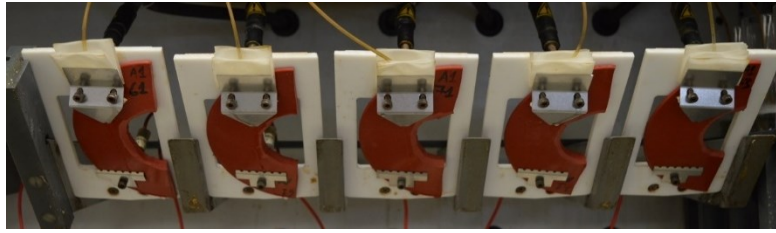


α



β

Σχήμα 3-42. (α) Μισό κυάθιο συνθετικού μονωτήρα ως δοκίμιο για τη δοκιμή του κεκλιμένου επιπέδου, μεταλλικά ηλεκτρόδια και χάρτινο φίλτρο και (β) συσκευή δοκιμής κεκλιμένου επιπέδου.



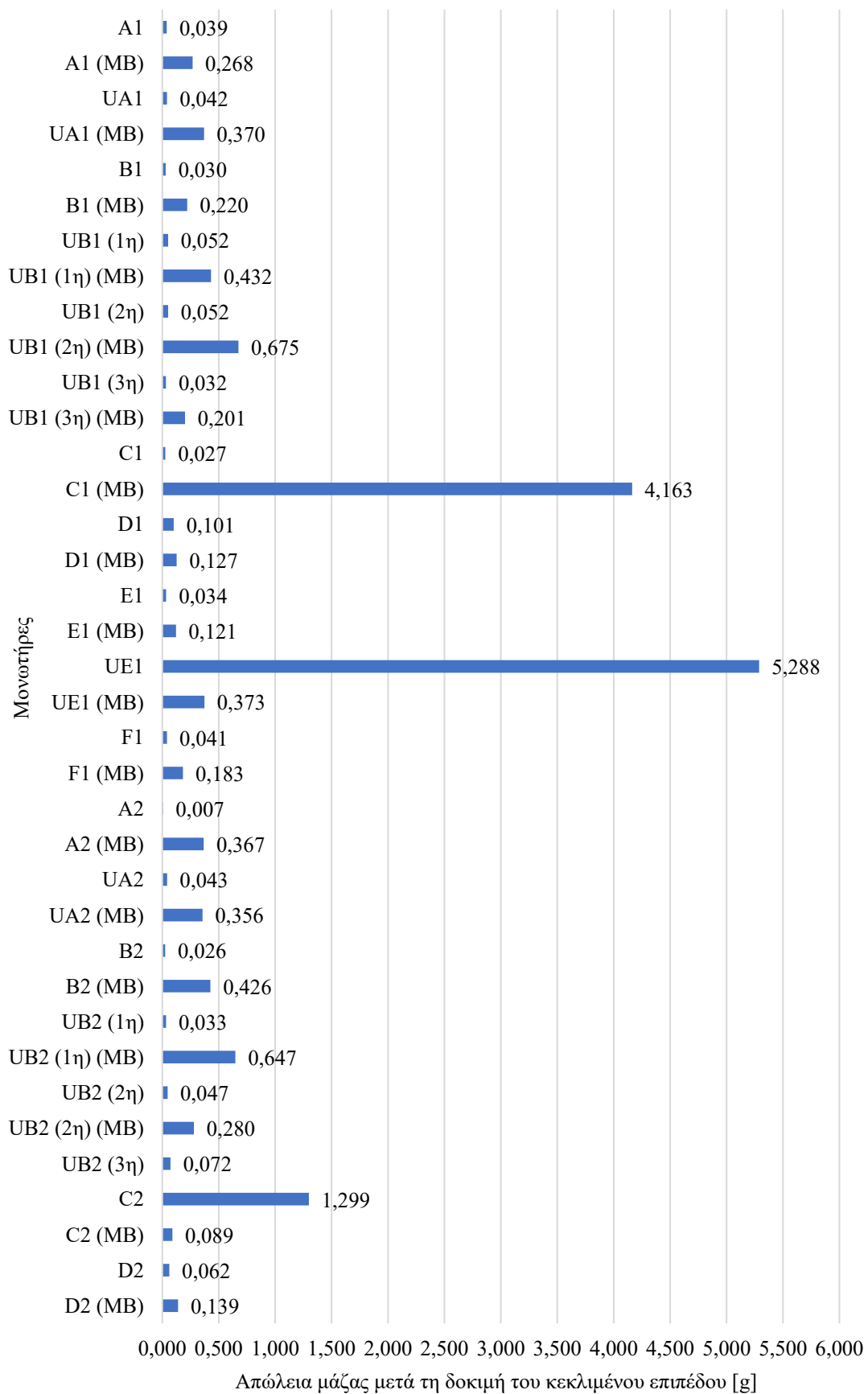
Σχήμα 3-43. Πέντε μισά κυάθια τοποθετημένα στη συσκευή της δοκιμής του κεκλιμένου επιπέδου και τα λαστιχάκια που οδηγούν το ρυπαντικό υγρό στο χάρτινο φίλτρο.

Στον πίνακα 3-21 φαίνονται τα αποτελέσματα της δοκιμής του κεκλιμένου επιπέδου για όλους τους διατιθέμενους μονωτήρες. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το χειρότερο από τα 5 δοκίμια για τον κάθε μονωτήρα όσον αφορά τη στήλη «Διαφορά μαζών μετά τη δοκιμή [g]» (παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το δοκίμιο που είχε κάθε φορά τη μεγαλύτερη απώλεια μάζας μετά τη δοκιμή). Από τον πίνακα αυτόν φαίνεται ότι όλα τα δοκίμια (μισά κυάθια) είχαν πάχος μεταξύ περίπου 2,50 mm (στην εξωτερική λεπτή πλευρά τους) και 8 mm (στην εσωτερική πλευρά – κοντά στη ράβδο των μονωτήρων), πράγμα που όπως προαναφέρθηκε αποτελεί παρέκκλιση από το Πρότυπο IEC 60587 [84] που απαιτεί δοκίμια πάχους 6 mm. Όμως, παρότι υπήρχε αυτή η παρέκκλιση, παρατηρούμε ότι οι μονωτήρες πέρασαν με επιτυχία τη δοκιμή εκτός από 2 μισά κυάθια των μονωτήρων C1 μετά το βρασμό, 1 μισό κυάθιο των μονωτήρων UE1 και ένα μισό κυάθιο των μονωτήρων C2. Από το παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι εάν το υλικό του μονωτικού περιβλήματος περιέχει την κατάλληλη ποσότητα πληρωτικού υλικού ATH, τότε η δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου θα είναι επιτυχής παρά το μικρότερο των 6 mm πάχος των δοκιμίων.

Επίσης, παρατηρείται ότι η μάζα των δοκιμίων μετά το βρασμό των 42 h είναι ελαφρώς αυξημένη σε σχέση με την αρχική, λόγω απορρόφησης νερού από τα δοκίμια. Στη συνέχεια, μετά τη δοκιμή παρατηρούμε ότι όλα τα δοκίμια χάνουν κάποιο ποσοστό της αρχικής μάζας τους λόγω της διάβρωσης που προκαλείται από τη δοκιμή. Από τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής συμπεραίνεται ότι αυτή η απώλεια μάζας των δοκιμίων είναι το πιο αξιόπιστο και χρήσιμο μέγεθος για την ποσοτικοποίηση του αποτελέσματος αυτής της δοκιμής. Από την άλλη μεριά, η μέτρηση των διαστάσεων της διάβρωσης δεν είναι τόσο αξιόπιστο μέγεθος για το αποτέλεσμα της δοκιμής αυτής, αυτές οι διαστάσεις αφορούν το μέγιστο μήκος, πλάτος και βάθος της διάβρωσης χωρίς να υπάρχει κάποια πληροφορία σχετικά με το σχήμα της. Έτσι, με αυτές τις τιμές είναι δύσκολο κανείς να συγκρίνει τη διάβρωση μεταξύ διαφορετικών δοκιμίων.

Πίνακας 3-21. Αποτελέσματα της δοκιμής του κεκλιμένου επιπέδου για 5 μισά κυάθια από έναν καινούριο μονωτήρα από κάθε κατασκευαστή και από κάθε τύπο και από ένα μεταχειρισμένο μονωτήρα από κάθε χρωματική ομάδα των πινάκων 3-5 και 3-6 (MB: Μετά από το Βρασμό 42 ωρών, E: Επιτυχές, A: Ανεπιτυχές, 1η: 1η χρωματική ομάδα, 2η: 2η χρωματική ομάδα, 3η: 3η χρωματική ομάδα).

Μονωτήρας	Εύρος πάχους [mm]	Μάζα πριν βρασμό [g]	Μάζα μετά βρασμό [g]	Διαφορά μαζών λόγω βρασμού [g]	Μάζα μετά τη δοκιμή [g]	Διαφορά μαζών μετά τη δοκιμή [g]	Διαστάσεις διάβρωσης			Επιτυχή δοκιμή / όλα τα δοκιμή	Αποτέλεσμα
							Μήκος [mm]	Πλάτος [mm]	Βάθος [mm]		
A1	2,81-7,10	42,490	-	-	42,451	-0,039	10,07	17,64	0,69	5/5	E
A1 (MB)	2,96-6,93	43,309	43,776	0,467	43,508	-0,268	6,8	7,1	0,67	5/5	E
UA1	2,68-6,99	43,686	-	-	43,644	-0,042	6,71	12,13	0,82	5/5	E
UA1 (MB)	2,76-7,26	44,115	44,388	0,273	44,018	-0,370	7,7	16,26	0,93	5/5	E
B1	3,00-5,08	25,024	-	-	24,994	-0,030	5,71	11,93	0,6	5/5	E
B1 (MB)	2,85-4,79	24,494	24,727	0,233	24,507	-0,220	9,83	17,54	0,96	5/5	E
UB1 (1η)	3,11-6,09	40,819	-	-	40,767	-0,052	2,93	6,35	0,53	5/5	E
UB1 (1η) (MB)	2,56-6,24	46,675	46,787	0,112	46,355	-0,432	8,17	13,19	0,45	5/5	E
UB1 (2η)	2,80-4,94	24,093	-	-	24,041	-0,052	7,5	16,5	0,88	5/5	E
UB1 (2η) (MB)	2,74-4,48	23,662	24,862	1,200	24,187	-0,675	5,67	11,22	0,56	5/5	E
UB1 (3η)	2,72-5,53	25,559	-	-	25,527	-0,032	3,75	14,1	0,36	5/5	E
UB1 (3η) (MB)	2,55-4,65	24,671	24,868	0,197	24,667	-0,201	8,03	11,59	0,67	5/5	E
C1	2,87-5,32	24,629	-	-	24,602	-0,027	10,56	10,07	0,86	5/5	E
C1 (MB)	2,82-5,36	24,296	24,337	0,041	20,174	-4,163	30,25	31,19	Τρύπα	3/5	A
D1	3,42-8,07	64,305	-	-	64,204	-0,101	4,15	10,66	0,57	5/5	E
D1 (MB)	3,68-8,04	58,394	58,512	0,118	58,385	-0,127	5,18	10,6	0,59	5/5	E
E1	2,75-4,77	27,552	-	-	27,518	-0,034	8,29	4,79	0,53	5/5	E
E1 (MB)	2,81-4,81	26,993	27,031	0,038	26,910	-0,121	4,29	10,72	0,92	5/5	E
UE1	2,78-4,70	25,637	-	-	20,349	-5,288	59,32	33,8	Τρύπα	4/5	A
UE1 (MB)	2,63-4,53	25,572	25,766	0,194	25,393	-0,373	8,27	8,05	0,51	5/5	E
F1	2,73-5,29	26,996	-	-	26,955	-0,041	5,63	8,79	0,59	5/5	E
F1 (MB)	2,74-4,62	23,111	23,161	0,050	22,978	-0,183	-	-	-	5/5	E
A2	2,65-6,03	32,136	-	-	32,129	-0,007	3,19	9,99	0,87	5/5	E
A2 (MB)	2,57-5,93	30,970	31,531	0,561	31,164	-0,367	7,94	13,19	0,67	5/5	E
UA2	2,76-5,76	30,100	-	-	30,057	-0,043	7,26	19,1	0,85	5/5	E
UA2 (MB)	2,88-6,00	31,144	31,568	0,424	31,212	-0,356	9,84	13,04	0,95	5/5	E
B2	2,76-5,40	34,642	-	-	34,616	-0,026	6,57	12,87	1,19	5/5	E
B2 (MB)	2,78-4,82	24,969	25,193	0,224	24,767	-0,426	17,03	15,61	2,61	5/5	E
UB2 (1η)	2,90-6,19	38,957	-	-	38,924	-0,033	5,42	10,78	0,83	5/5	E
UB2 (1η) (MB)	2,82-5,65	35,280	36,068	0,788	35,421	-0,647	8,32	10,49	0,7	5/5	E
UB2 (2η)	2,98-5,67	35,339	-	-	35,292	-0,047	9,07	26,11	0,64	5/5	E
UB2 (2η) (MB)	2,73-6,46	38,473	38,759	0,286	38,479	-0,280	9,08	14,36	0,78	5/5	E
UB2 (3η)	2,93-6,27	33,800	-	-	33,728	-0,072	7,08	10,26	0,65	5/5	E
C2	2,48-5,72	21,678	-	-	20,379	-1,299	18,88	17,34	Τρύπα	4/5	A
C2 (MB)	2,77-5,51	22,774	22,819	0,045	22,730	-0,089	8,81	24,55	0,66	5/5	E
D2	3,69-7,89	57,390	-	-	57,328	-0,062	6,79	17,35	1,18	5/5	E
D2 (MB)	3,91-7,80	62,085	62,247	0,162	62,108	-0,139	5,86	12,28	0,51	5/5	E



Σχήμα 3-44. Απώλεια μάζας των δοκιμίων μετά τη δοκιμή του κεκλιμένου επιπέδου, λόγω της διάβρωσης που προκαλεί η δοκιμή (MB: Μετά από το Βρασμό 42 ωρών).

Στο σχήμα 3-44 παρουσιάζεται η διαφορά της μάζας των δοκιμίων πριν τη δοκιμή με τη μάζα μετά τη δοκιμή για να γίνουν πιο εμφανή τα αποτελέσματα. Παρατηρούμε ότι όταν εφαρμόζεται ο βρασμός των 42 h η καταπόνηση κατά τη δοκιμή είναι πιο μεγάλη και κατά συνέπεια, χάνεται μεγαλύτερο ποσοστό μάζας από τα δοκίμια. Το παραπάνω βέβαια δεν ίσχυσε στην περίπτωση των UE1 / UE1 (MB) και C2 / C2 (MB), όπου βλέπουμε ότι η δοκιμή ήταν ανεπιτυχής πριν το βρασμό. Από αυτό μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι δεν είναι τόσο ουσιαστικό να εφαρμόζεται ο βρασμός των 42 h, αλλά αντ' αυτού να πραγματοποιείται η δοκιμή σε περισσότερα από 5 δοκίμια που αναφέρει το Πρότυπο IEC 60587 [84], τα οποία να έχουν ληφθεί από όλο το μήκος του μονωτήρα για να διαφανεί αν το υλικό είναι ομοιόμορφο σε όλο το μονωτήρα. Συμπερασματικά, για να είναι αξιόπιστο το υλικό του μονωτικού περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων θα πρέπει να περάσει με επιτυχία τη δοκιμή του κεκλιμένου επιπέδου παρά την όποια απόκλιση των δοκιμίων από το πάχος των 6 mm που ορίζει το Πρότυπο IEC 60587 [84].

Τέλος, στο σχήμα 3-45 φαίνονται ένα μισό κύαθιο συνθετικού μονωτήρα μετά τη δοκιμή του κεκλιμένου επιπέδου που έχει περάσει επιτυχώς τη δοκιμή του κεκλιμένου επιπέδου (α) και ένα μισό κύαθιο που απέτυχε κατά τη δοκιμή (β).



α



β

Σχήμα 3-45. (α) Μισό κύαθιο συνθετικού μονωτήρα που πέρασε επιτυχώς τη δοκιμή του κεκλιμένου επιπέδου και (β) μισό κύαθιο που απέτυχε στη δοκιμή αυτή.

3.4.1.4.2 Κατανομή δυναμικού και έντασης ηλεκτρικού πεδίου στη δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου

Για την καλύτερη κατανόηση της δοκιμής του κεκλιμένου επιπέδου και συγκεκριμένα για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο κατανέμεται το ηλεκτρικό δυναμικό και το ηλεκτρικό πεδίο επάνω στα δοκίμια, πραγματοποιήθηκαν πεδιακές προσομοιώσεις (με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων) στα δοκίμια της δοκιμής του κεκλιμένου επιπέδου [232]. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για αυτές τις προσομοιώσεις ήταν το COMSOL Multiphysics. Ο επιλύτης που επιλέχθηκε για τις προσομοιώσεις ήταν ο «Electric Currents»

και επιλέχθηκε, επίσης, η μελέτη: «Stationary», στην οποία δεν αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου οι μεταβλητές του πεδίου.

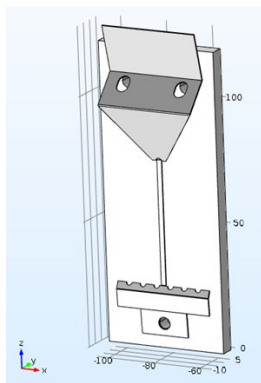
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η δοκιμή του κεκλιμένου επιπέδου σε συνθετικούς μονωτήρες έχει ένα πρόβλημα. Αυτό έγκειται στο ότι το Πρότυπο IEC 60587 [84] περιγράφει τη δοκιμή του κεκλιμένου επιπέδου για δοκίμια, τα οποία είναι παρασκευασμένα με συγκεκριμένες διαστάσεις και σχήμα για την πραγματοποίηση αυτής της δοκιμής. Το πρόβλημα είναι ότι όταν κάποιος θέλει να δοκιμάσει το μονωτικό περίβλημα ενός υπαρκτού συνθετικού μονωτήρα (τελικού προϊόντος), δε μπορεί με κανέναν τρόπο να παρασκευάσει τα δοκίμια που περιγράφει το Πρότυπο IEC 60587 [84]. Έτσι, συνήθως επιλέγεται να χρησιμοποιούνται για δοκίμια τα μισά κυάθια του μονωτήρα, αφού αυτά έχουν αφαιρεθεί με μαχαίρι από αυτόν. Στο σχήμα 3-42 και 3-43 φαίνονται τα κομμένα μισά κυάθια ενός μονωτήρα όπως αυτά τοποθετήθηκαν στη συσκευή του κεκλιμένου επιπέδου για την πραγματοποίηση της δοκιμής.

Επίσης, άλλο ένα θέμα που διαπιστώθηκε κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών του κεκλιμένου επιπέδου στους μονωτήρες, ήταν ότι το ρυπαντικό υγρό που έσταζε από το πάνω προς το κάτω ηλεκτρόδιο επί της επιφάνειας των δοκιμίων δεν ακολουθούσε ευθεία διαδρομή, αλλά τις περισσότερες φορές η πορεία του ήταν ακανόνιστη, δηλαδή έκανε κάποιο «ζιγκ ζαγκ».

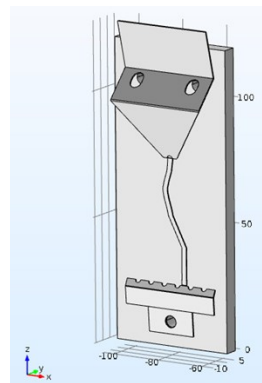
Έτσι, σε αυτή τη διδακτορική διατριβή μελετήθηκαν τέσσερα μοντέλα δοκιμίων κατά τη δοκιμή του κεκλιμένου επιπέδου για να διαφανούν οι διαφορές στις κατανομές του ηλεκτρικού δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου. Πιο συγκεκριμένα, τα μοντέλα που μελετήθηκαν ήταν τα παρακάτω:

1. δοκίμια κατασκευασμένα **κατά το Πρότυπο IEC 60587** [84], ως προς το σχήμα και τις διαστάσεις, με **ευθεία διαδρομή ρυπαντικού υγρού** (σχήμα 3-46 (α)),
2. δοκίμια κατασκευασμένα **κατά το Πρότυπο IEC 60587** [84], ως προς το σχήμα και τις διαστάσεις, με **ακανόνιστη διαδρομή ρυπαντικού υγρού** (σχήμα 3-46 (β)),
3. δοκίμια (**μισά κυάθια**) αποκομμένα με μαχαίρι από συνθετικό μονωτήρα (όπως γίνεται στην πράξη), με **ευθεία διαδρομή ρυπαντικού υγρού** (σχήμα 3-46 (γ)),
4. δοκίμια (**μισά κυάθια**) αποκομμένα με μαχαίρι από συνθετικό μονωτήρα (όπως γίνεται στην πράξη), με **ακανόνιστη διαδρομή ρυπαντικού υγρού** (σχήμα 3-46 (δ)).

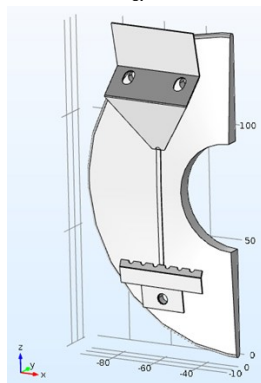
Κατά τις προσομοιώσεις αυτές, τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στα δεδομένα της πραγματικής δοκιμής. Δηλαδή, σε κάθε μοντέλο υπήρχαν 5 δοκίμια και οι αποστάσεις μεταξύ τους, καθώς και η θέση τους στον χώρο, καθορίστηκαν από μετρήσεις των διαστάσεων της συσκευής της εταιρίας Alpha Tec Medientechnik GmbH, με την οποία πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές του κεκλιμένου επιπέδου. Για καλύτερη κατανόηση, στο σχήμα 3-47 φαίνονται τα 5 δοκίμια που σχεδιάστηκαν σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 60587 [84], ως προς το σχήμα και τις διαστάσεις, με το ρυπαντικό υγρό να έχει ακανόνιστη διαδρομή στην επιφάνεια τους. Το μικρό ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο που τα περικλείει είναι μια περιοχή αέρα, διαστάσεων 500 mm x 60 mm x 190 mm, στο οποίο επιλέχθηκε το πλέγμα να είναι αρκετά πυκνό, ώστε να λαμβάνονται πιο ακριβή αποτελέσματα κατά τις προσομοιώσεις. Το μεγαλύτερο (εξωτερικό) ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, με διαστάσεις 900 mm x 350 mm x 600 mm, αναπαριστά το θάλαμο της συσκευής του κεκλιμένου επιπέδου που χρησιμοποιήθηκε για αυτή τη διδακτορική διατριβή. Όπως και το μικρό ορθογώνιο, έτσι και το μεγαλύτερο περιλάμβανε αέρα, αλλά με πιο αραιό πλέγμα αυτή τη φορά, με σκοπό την εξοικονόμηση υπολογιστικών πόρων. Τα παραπάνω εφαρμόστηκαν και στα υπόλοιπα τρία μοντέλα των προσομοιώσεων.



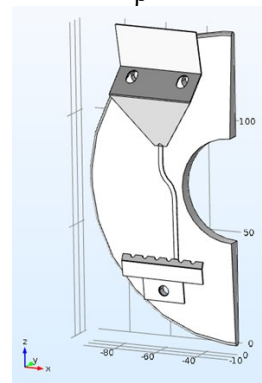
α



β

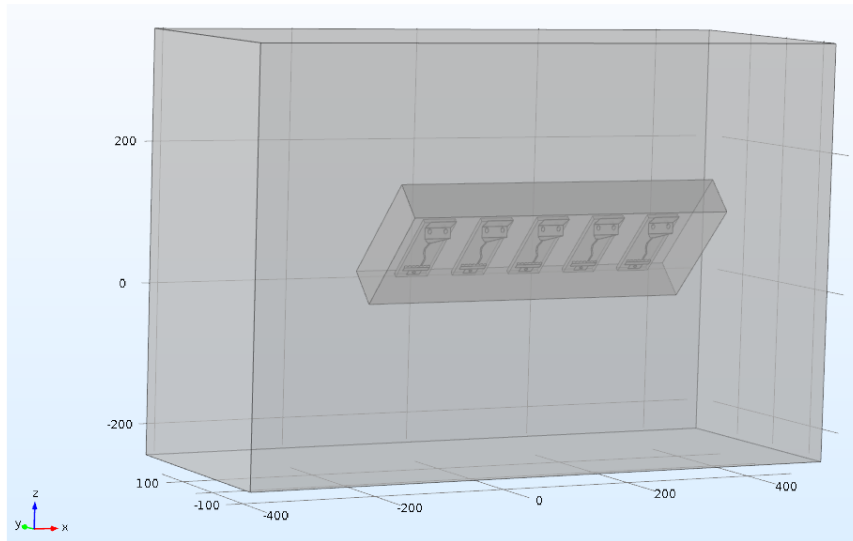


γ



δ

Σχήμα 3-46. Μοντέλα που προσομοιώθηκαν: δοκίμια σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 60587 [84] (α) με ευθεία και (β) με ακανόνιστη διαδρομή ρυπαντικού υγρού και δοκίμια (μισά κυάθια) κομμένα από συνθετικό μονωτήρα (γ) με ευθεία και (δ) με ακανόνιστη διαδρομή ρυπαντικού υγρού.



Σχήμα 3-47. Πλήρης γεωμετρία του μοντέλου με πέντε δοκίμια κατασκευασμένα σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 60587 [84] με ακανόνιστη διαδρομή ρυπαντικού υγρού και με το εξωτερικό ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο που αναπαριστά το θάλαμο δοκιμής της συσκευής που χρησιμοποιήθηκε.

Πρέπει να αναφερθεί εδώ ότι κατά τη διάρκεια της δοκιμής αυτής αλλοιώνονται σημαντικά τα μεταλλικά ηλεκτρόδια και τα δοκίμια με την πάροδο του χρόνου, πράγμα που είναι δύσκολο να προσομοιωθεί με κάποιο μοντέλο. Έτσι, σε όλα τα μοντέλα αυτών των προσομοιώσεων έγινε η επιλογή να μελετηθεί ένα στιγμιότυπο κατά το αρχικό στάδιο της δοκιμής όταν η εφαρμοζόμενη τάση έχει φτάσει τη μέγιστη τιμή της (4,5kV). Επίσης, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως σε κανένα μοντέλο δεν έγινε προσομοίωση του συστήματος εξαερισμού της διάταξης.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις αυτές αναγράφονται παρακάτω. Οι ιδιότητες τους φαίνονται στον πίνακα 3-22:

- ♦ Σιλικονούχο καουτσούκ με τριένυδρη αλουμίνα ως πληρωτικό υλικό (Silicone Rubber with ATH filler), ως υλικό των δοκιμίων.
- ♦ Ρυπαντικό υγρό που αποτελούταν από 0,1 % \pm 0,002 % κατά βάρος χλωριούχο αμμώνιο (NH₄CL: ammonium chloride), από 0,02 % \pm 0,002 % κατά βάρος Triton X-100 και το υπόλοιπο μέρος από απιονισμένο νερό και πληρούσε τις προδιαγραφές του Προτύπου IEC 60587 [84].

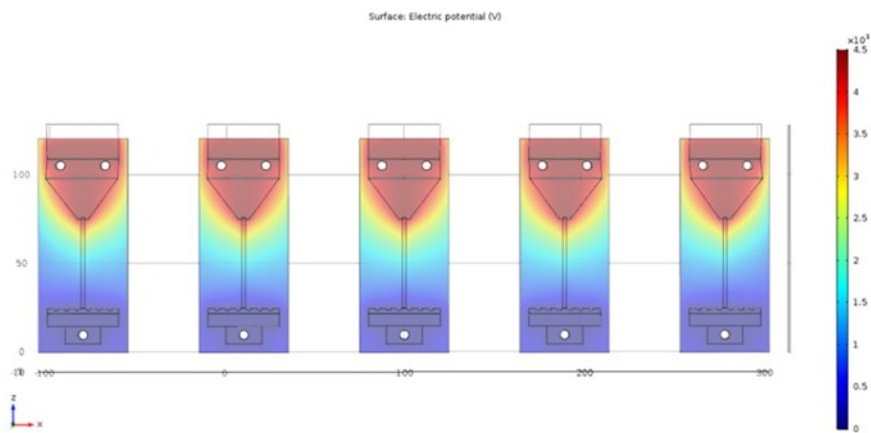
- ♦ Γαλβανισμένο ατσάλι (Galvanized Steel), για τα μεταλλικά ηλεκτρόδια (άνω και κάτω) που χρησιμοποιούνται για τη δοκιμή του κεκλιμένου επιπέδου. Για το υλικό αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλεγμένες ιδιότητες του λογισμικού COMSOL Multiphysics.
- ♦ Αέρας στις περιοχές των δύο ορθογώνιων παραλληλεπιπέδων.

Πίνακας 3-22. Ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις.

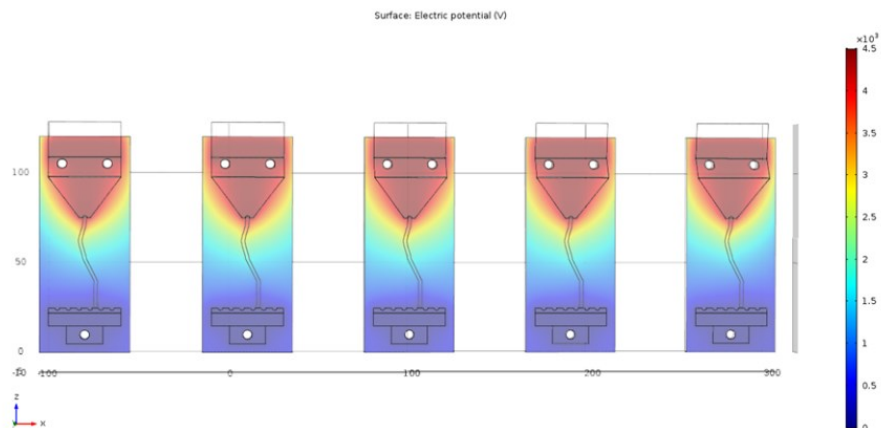
Υλικό	Ηλεκτρική αγωγιμότητα σ [S/m]	Διηλεκτρική σταθερά ϵ_r
Silicone Rubber with ATH	10^{-13}	3,7
Ρυπαντικό υγρό	0,026	81
Αέρας	$2 \cdot 10^{-4}$	1

Ο υπολογιστής που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις αυτές είχε 32 GB RAM και ο μέσος χρόνος προσομοίωσης ανά μοντέλο ήταν περίπου 25 λεπτά.

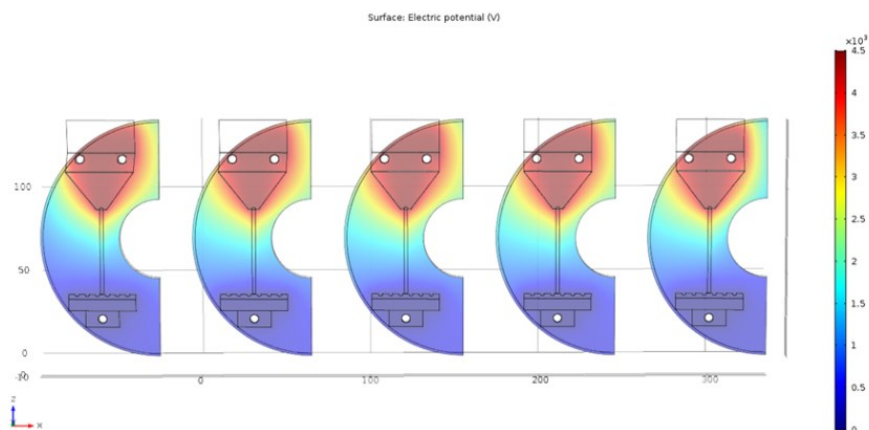
Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από αυτές τις προσομοιώσεις φαίνονται παρακάτω. Στα σχήματα 3-48 έως 3-51 φαίνονται με χρωματικές απεικονίσεις οι κατανομές του ηλεκτρικού δυναμικού στα προαναφερθέντα μοντέλα 1 έως 4 κατ' αντιστοιχία.



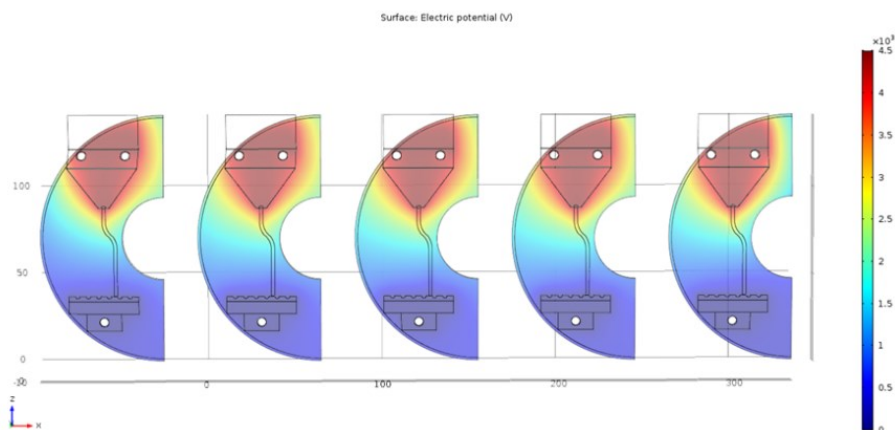
Σχήμα 3-48. Κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού στα δοκίμια του μοντέλου 1.



Σχήμα 3-49. Κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού στα δοκίμια του μοντέλου 2.

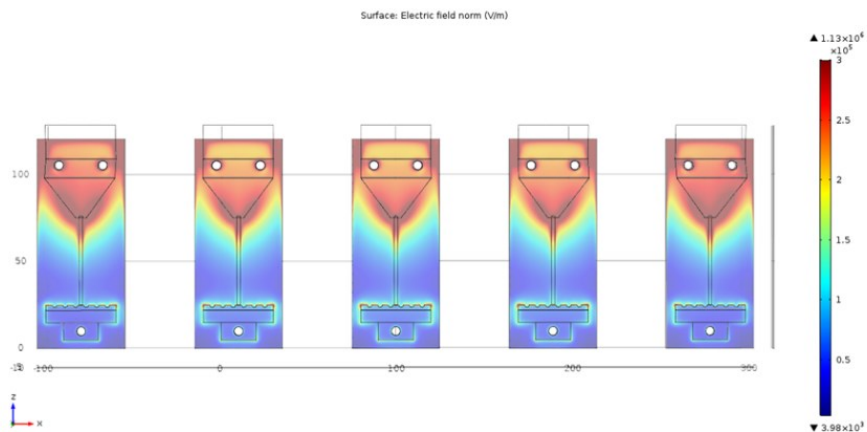


Σχήμα 3-50. Κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού στα δοκίμια του μοντέλου 3.

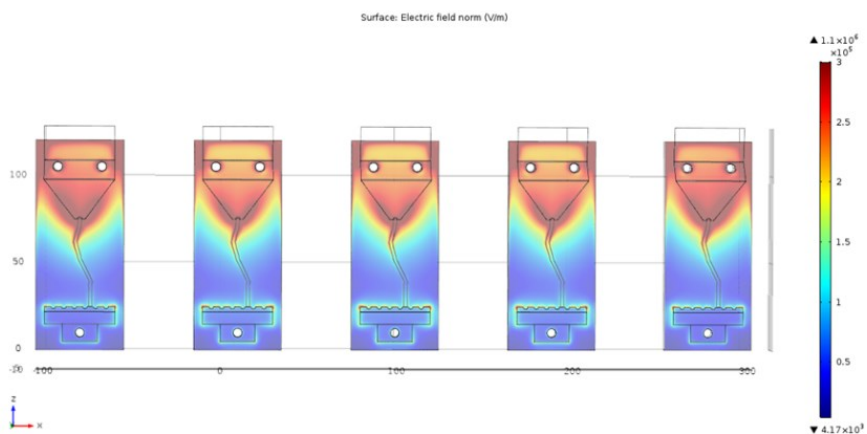


Σχήμα 3-51. Κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού στα δοκίμια του μοντέλου 4.

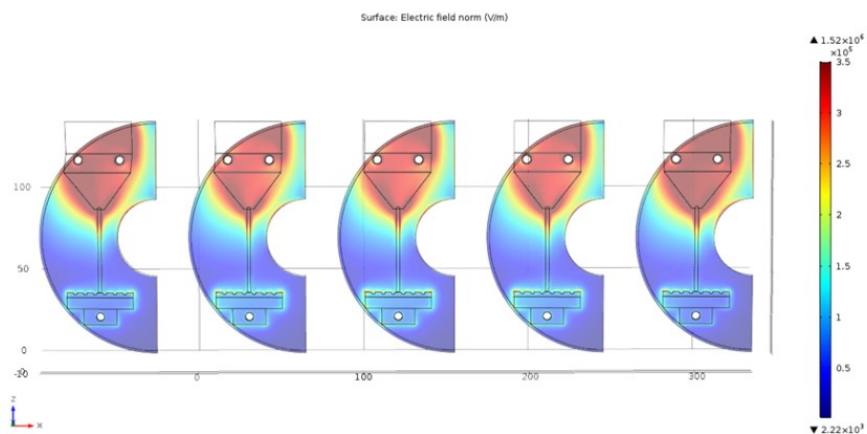
Στα σχήματα 3-52 έως 3-55 φαίνονται με χρωματικές απεικονίσεις οι κατανομές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στα μοντέλα 1 έως 4 κατ' αντιστοιχία.



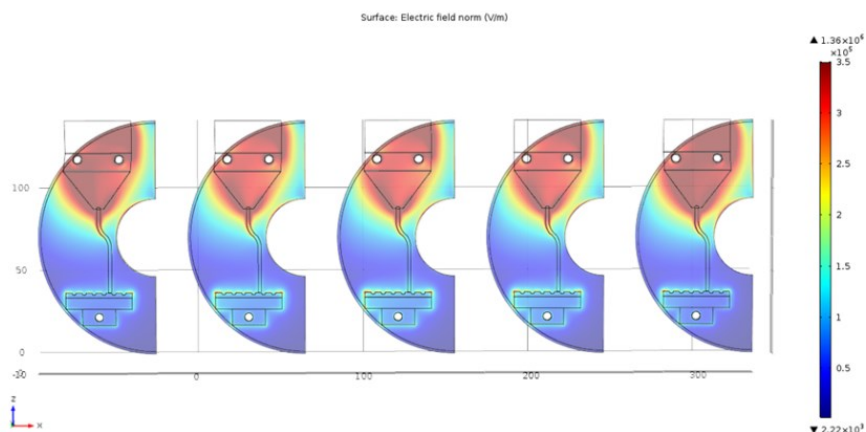
Σχήμα 3-52. Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στα δοκίμια του μοντέλου 1.



Σχήμα 3-53. Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στα δοκίμια του μοντέλου 2.

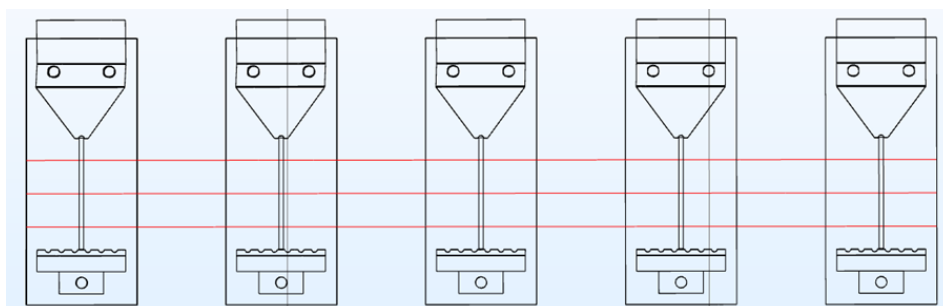


Σχήμα 3-54. Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στα δοκίμια του μοντέλου 3.

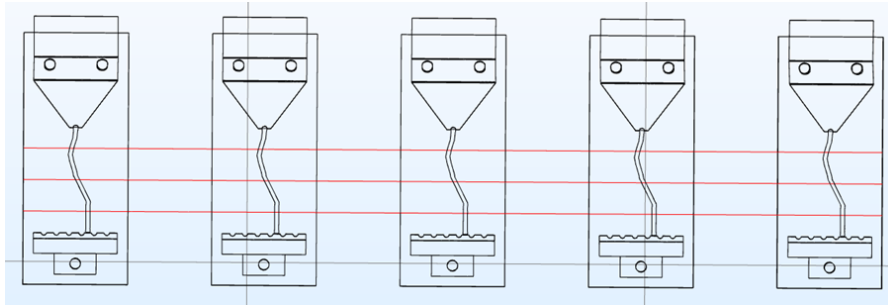


Σχήμα 3-55. Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στα δοκίμια του μοντέλου 4.

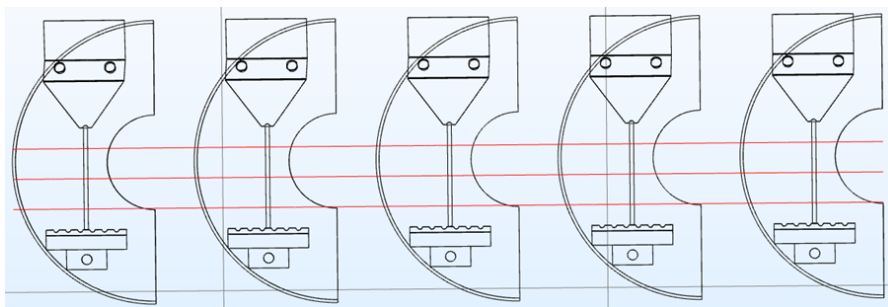
Στα σχήματα 3-56 έως 3-59 φαίνονται οι οριζόντιες γραμμές (cut lines) κατά μήκος των οποίων λήφθηκαν οι τιμές του ηλεκτρικού δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για να δημιουργηθούν γραφικές παραστάσεις και να είναι πιο εύκολες οι συγκρίσεις μεταξύ των μοντέλων. Οι τρεις οριζόντιες γραμμές σχεδιάστηκαν σε απόσταση 0,01 mm από την επιφάνεια των δοκιμίων. Η μεσαία γραμμή σε όλα τα μοντέλα σχεδιάστηκε στο μέσον της απόστασης των δύο μεταλλικών ηλεκτροδίων και οι άλλες δύο γραμμές σε απόσταση 15 mm από τη μεσαία. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι για τις περιπτώσεις των μοντέλων 3 και 4, όπου δηλαδή για δοκίμια χρησιμοποιούνται τα μισά κυάθια, οι οριζόντιες γραμμές (cut lines) σχεδιάστηκαν σε απόσταση 0,01 mm από το παχύτερο σημείο των δοκιμίων. Τα δοκίμια στην περίπτωση του μοντέλου 3 και 4 είναι μεταβλητού πάχους από 3 mm στην εξωτερική πλευρά τους έως 6 mm στην εσωτερική πλευρά (ως εσωτερική πλευρά ορίζεται η πλευρά που βρίσκεται κοντά στη ράβδο του συνθετικού μονωτήρα).



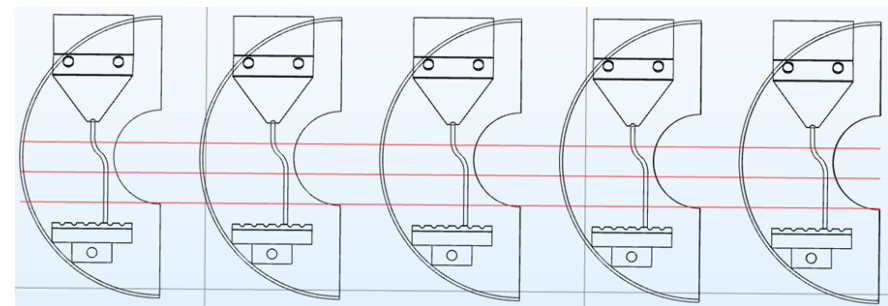
Σχήμα 3-56. Οριζόντιες γραμμές (cut lines), στα δοκίμια του μοντέλου 1, κατά μήκος των οποίων λήφθηκαν οι τιμές του ηλεκτρικού δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου με σκοπό τη δημιουργία γραφικών παραστάσεων.



Σχήμα 3-57. Οριζόντιες γραμμές (cut lines), στα δοκίμια του μοντέλου 2, κατά μήκος των οποίων λήφθηκαν οι τιμές του ηλεκτρικού δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου με σκοπό τη δημιουργία γραφικών παραστάσεων.

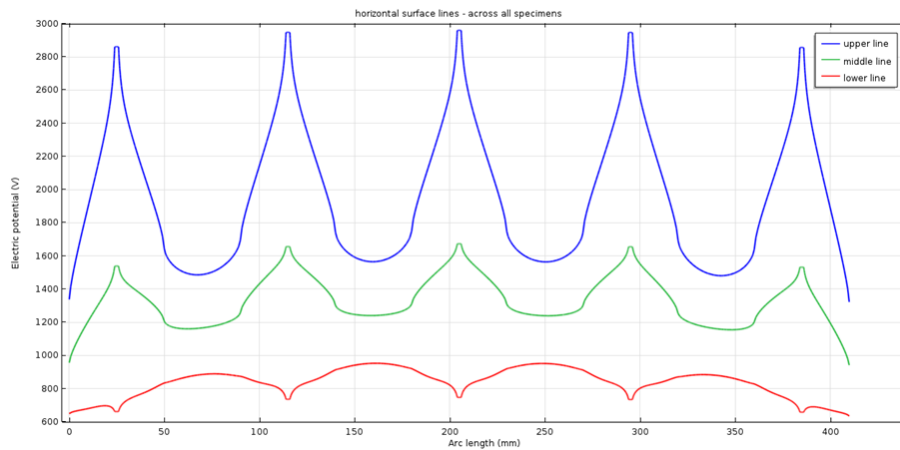


Σχήμα 3-58. Οριζόντιες γραμμές (cut lines), στα δοκίμια του μοντέλου 3, κατά μήκος των οποίων λήφθηκαν οι τιμές του ηλεκτρικού δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου με σκοπό τη δημιουργία γραφικών παραστάσεων.

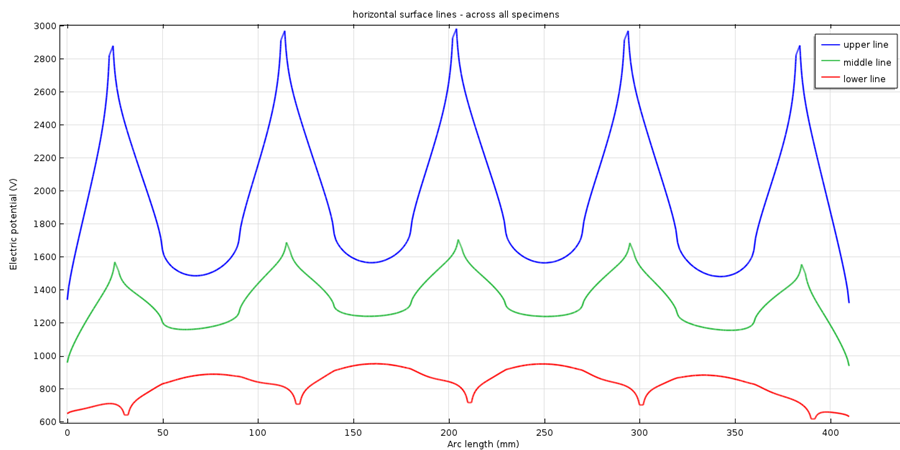


Σχήμα 3-59. Οριζόντιες γραμμές (cut lines), στα δοκίμια του μοντέλου 4, κατά μήκος των οποίων λήφθηκαν οι τιμές του ηλεκτρικού δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου με σκοπό τη δημιουργία γραφικών παραστάσεων.

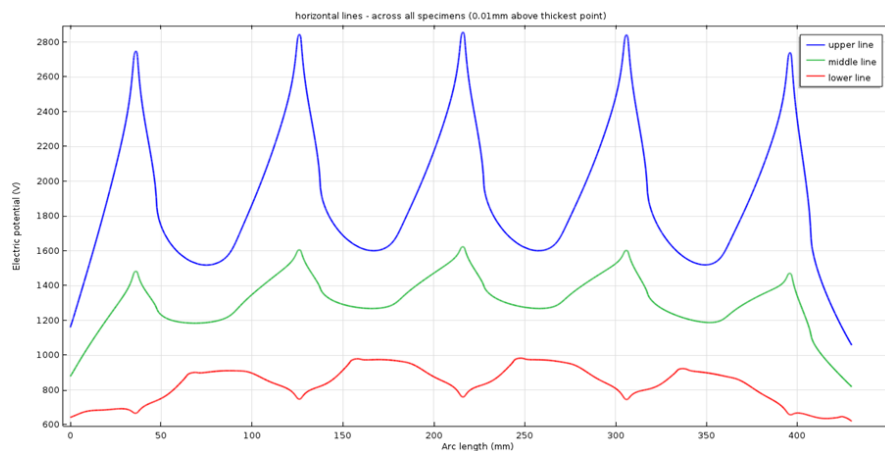
Στα σχήματα 3-60 έως και 3-63 παρουσιάζονται οι τιμές του ηλεκτρικού δυναμικού κατά μήκος των τριών οριζόντιων γραμμών (cut lines) μετά την εκτέλεση των προσομοιώσεων για κάθε ένα από τα 4 μοντέλα αντίστοιχα.



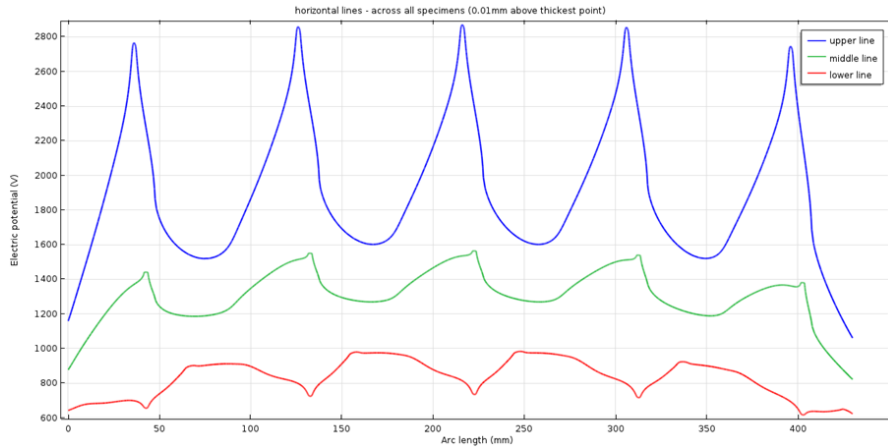
Σχήμα 3-60. Τιμές του ηλεκτρικού δυναμικού κατά μήκος των τριών cut lines στην επιφάνεια των δοκιμίων του μοντέλου 1.



Σχήμα 3-61. Τιμές του ηλεκτρικού δυναμικού κατά μήκος των τριών cut lines στην επιφάνεια των δοκιμίων του μοντέλου 2.

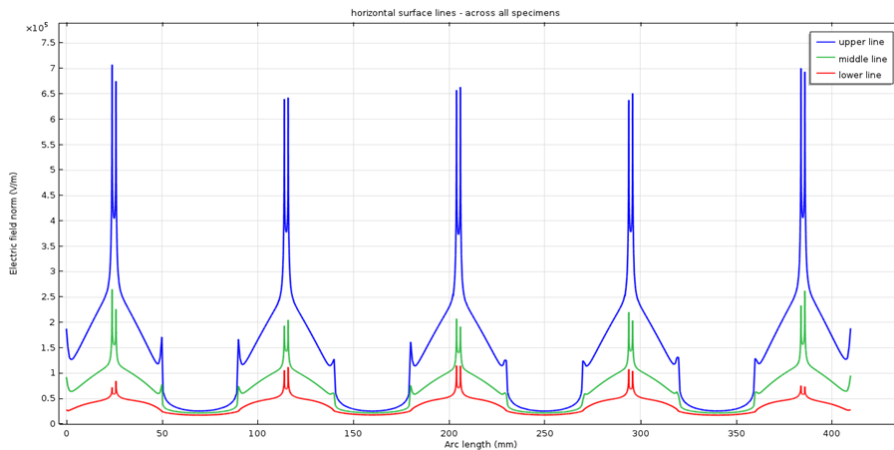


Σχήμα 3-62. Τιμές του ηλεκτρικού δυναμικού κατά μήκος των τριών cut lines στην επιφάνεια των δοκιμίων του μοντέλου 3.

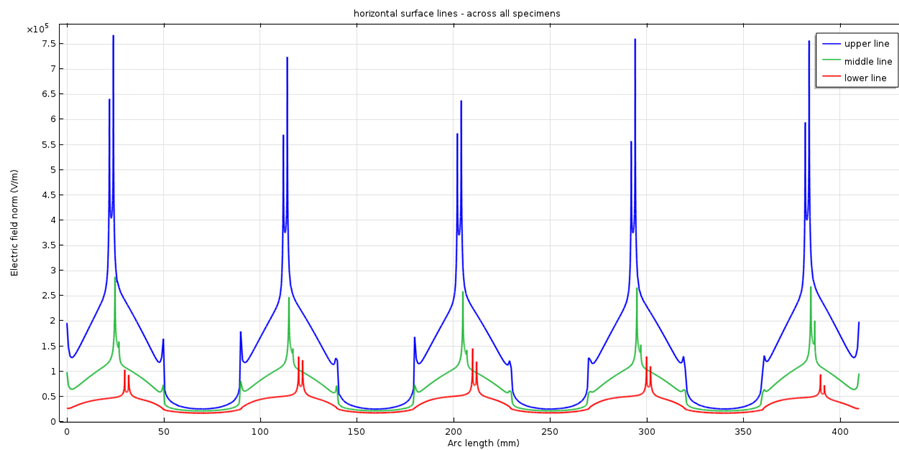


Σχήμα 3-63. Τιμές του ηλεκτρικού δυναμικού κατά μήκος των τριών cut lines στην επιφάνεια των δοκιμίων του μοντέλου 4.

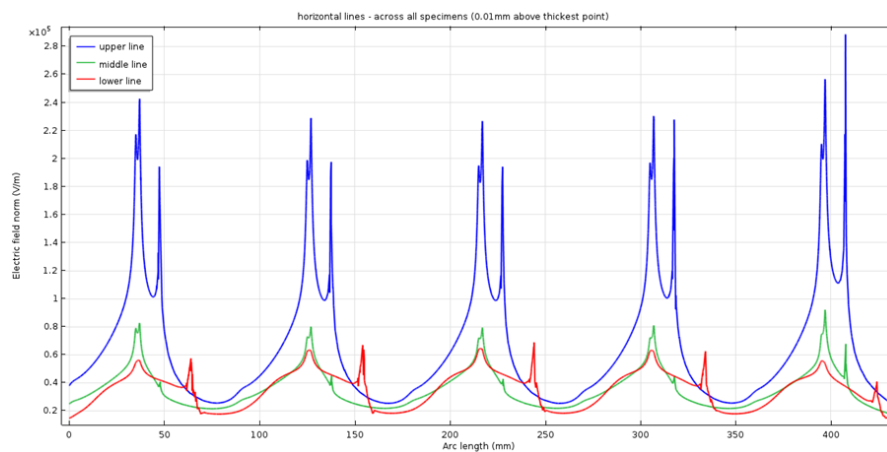
Στα σχήματα 3-60 έως 3-63 παρατηρούμε ότι οι τιμές του ηλεκτρικού δυναμικού δε διαφέρουν ιδιαίτερα μεταξύ των 4 μοντέλων. Το δυναμικό λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές στα 3 μεσαία δοκίμια και για στις τρεις cut lines σε όλα τα μοντέλα. Ωστόσο, αυτό που έχει ιδιαίτερη σημασία σε αυτές τις κυματομορφές είναι η κλίση τους, η οποία επηρεάζει τις τιμές που λαμβάνει η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ($E = -\nabla V$). Στα σχήματα 3-64 έως και 3-67 φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος των «cut lines» για τα μοντέλα 1 έως 4 αντίστοιχα.



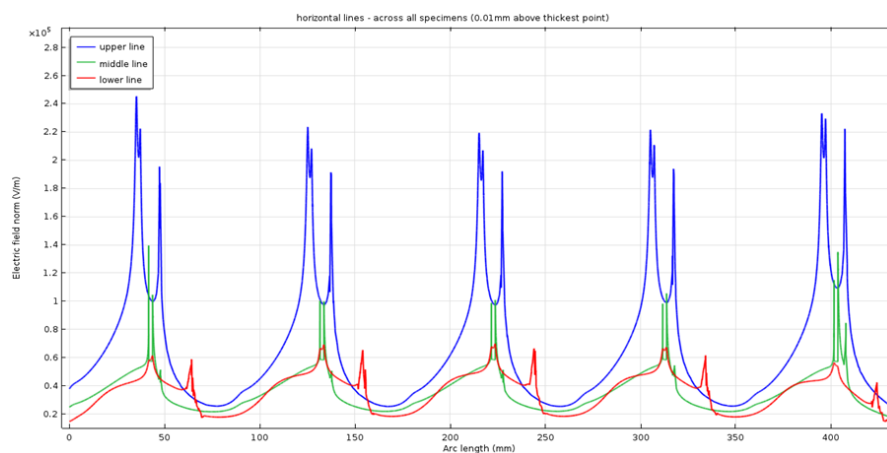
Σχήμα 3-64. Τιμές του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος των τριών cut lines στην επιφάνεια των δοκιμίων του μοντέλου 1.



Σχήμα 3-65. Τιμές του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος των τριών cut lines στην επιφάνεια των δοκιμών του μοντέλου 2.



Σχήμα 3-66. Τιμές του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος των τριών cut lines στην επιφάνεια των δοκιμών του μοντέλου 3.



Σχήμα 3-67. Τιμές του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος των τριών cut lines στην επιφάνεια των δοκιμών του μοντέλου 4.

Παρατηρώντας τα σχήματα 3-64 έως και 3-67 συμπεραίνουμε ότι:

- Οι τιμές που λαμβάνει το ηλεκτρικό πεδίο είναι μεγαλύτερες στα μοντέλα 1 και 2 σε σχέση με τα μοντέλα 3 και 4. Από αυτό το γεγονός όμως δε μπορούμε να πούμε ότι η καταπόνηση που υφίστανται τα δοκίμια στα μοντέλα 1 και 2, λόγω του ηλεκτρικού πεδίου, είναι μεγαλύτερη από αυτήν που υφίστανται στα μοντέλα 3 και 4, καθώς οι «cut lines» στα μοντέλα 3 και 4 δεν ισαπέχουν σε όλα τα σημεία τους από την επιφάνεια των δοκιμίων λόγω του μεταβλητού πάχους που έχουν αυτά τα δοκίμια (3-6 mm). Έτσι, η σύγκριση μεταξύ των μοντέλων 1 και 2 και των μοντέλων 3 και 4 δε μπορεί να γίνει εύκολά λόγω αυτής της ιδιαιτερότητας.
- Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι μεγαλύτερη στην επάνω «cut line (upper line)», έπειτα ακολουθεί η μεσαία «cut line (middle line)» και τέλος οι μικρότερες εντάσεις ηλεκτρικού πεδίου εμφανίζονται στην κάτω «cut line (lower line)». Επίσης, στα σχήματα 3-64 έως 3-67 μπορεί κανείς να δει και τις τιμές που λαμβάνει το ηλεκτρικό πεδίο σε κάθε μία από τις «cut lines».
- Σε όλα τα μοντέλα βλέπουμε ότι εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές ηλεκτρικού πεδίου στο αριστερό και στο δεξί δοκίμιο, όταν αναφερόμαστε στις περιοχές των «upper» και «middle lines», ενώ για τις περιοχές που ορίζονται από τις «lower lines» παρατηρούμε ότι το ηλεκτρικό πεδίο έχει μεγαλύτερες τιμές στα 3 μεσαία δοκίμια.
- Τέλος, οι κορυφές (μύτες) του ηλεκτρικού πεδίου που εμφανίζονται στις γραφικές παραστάσεις είναι γενικά στα σημεία όπου υπάρχουν ακμές και γωνίες στη διάταξη. Για παράδειγμα στα σχήματα 3-64 και 3-65 τα μέγιστα των γραφικών παραστάσεων εντοπίζονται στην περιοχή που βρίσκεται το ρυπαντικό υγρό και ιδιαίτερα στα όρια αυτού. Στα σχήματα 3-66 και 3-67, ομοίως, οι μέγιστες τιμές του ηλεκτρικού πεδίου βρίσκονται στην περιοχή του ρυπαντικού υγρού και ιδιαίτερα στα όρια αυτού. Όμως, σε αυτά τα δύο μοντέλα βλέπουμε και μία τρίτη κορυφή (την δεξιά), η οποία εμφανίζεται λόγω της σχεδίασης των «cut lines» σε αυτά τα μοντέλα, που όπως προαναφέρθηκε, λόγω του μεταβλητού πάχους των δοκιμίων, δεν ισαπέχουν όλα τα σημεία των «cut lines» από την επιφάνεια των δοκιμίων. Έτσι, αυτές οι δεξιές κορυφές προκύπτουν επειδή σε εκείνα τα σημεία των δοκιμίων οι «cut lines» απέχουν 0,01 mm, ενώ όλα τα υπόλοιπα σημεία απέχουν περισσότερο λόγω του μεταβλητού πάχους των δοκιμίων.

3.4.1.5 Δοκιμή εφελκυσμού και μέγιστης επιμήκυνσης (*tensile strength and maximum elongation test*)

Στο υποκεφάλαιο 2.2.1.5 της παρούσης διδακτορικής διατριβής έχει γίνει παράθεση διαφόρων ευρημάτων από όλο τον κόσμο σχετικά με τη δοκιμή εφελκυσμού και μέγιστης επιμήκυνσης σε συνθετικούς μονωτήρες. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η δοκιμή αυτή πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το Πρότυπο ISO 37 [93]. Η θερμοκρασία του εργαστηρίου κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών κυμαινόταν στο εύρος 21 - 22 °C. Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των δοκιμών ήταν η Instron 3344. Ο τύπος των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση των δοκιμών ήταν: «αλτήρας (dumb-bell)» τύπου 2. Οι διαστάσεις των δοκιμών ορίζονται στο Πρότυπο ISO 37 [93] και η παρασκευή των δοκιμών έγινε με τη βοήθεια μιας χειροκίνητης συσκευής και ενός μεταλλικού καλουπιού κοπής, όπως φαίνεται στο σχήμα 3-68 (α) και (β) αντίστοιχα.



α

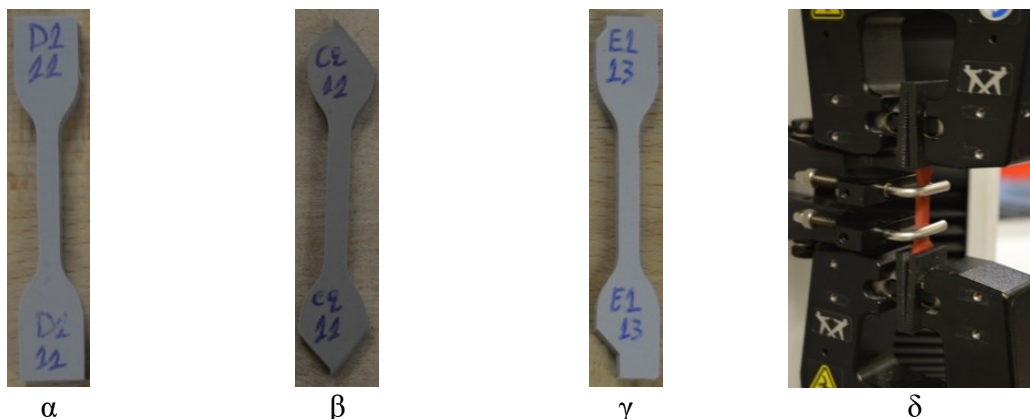


β

Σχήμα 3-68. α) Χειροκίνητη συσκευή στην οποία τοποθετείται το καλούπι και β) καλούπι κοπής δοκιμών.

Το Πρότυπο ISO 37 [93] απαιτεί δοκίμια συγκεκριμένων διαστάσεων. Όταν όμως αυτή η δοκιμή πρόκειται να εφαρμοστεί σε δοκίμια που θα κοπούν από το μονωτικό υλικό συνθετικών μονωτήρων (τελικών προϊόντων), τότε ορισμένες αποκλίσεις από το Πρότυπο είναι αναπόφευκτες. Μία τέτοια απόκλιση προκύπτει για το σχήμα των δοκιμών που κόβονται. Σε αυτή τη διδακτορική διατριβή τα δοκίμια κόπηκαν από τα κυάθια των μονωτήρων, τα οποία είχαν διαφορετικό μέγεθος ανάλογα με τον κατασκευαστή και κατά συνέπεια κάποιες φορές δεν υπήρχε αρκετό υλικό ώστε να κοπεί ένα πλήρες – ολόκληρο δοκίμιο, όπως αυτό απαιτείται από το Πρότυπο ISO 37 [93] (σχήμα 3-69 (α)). Έτσι, σε μια τέτοια περίπτωση μικρού κυαθίου προκύπτουν μη πλήρη δοκίμια, όπως αυτά που

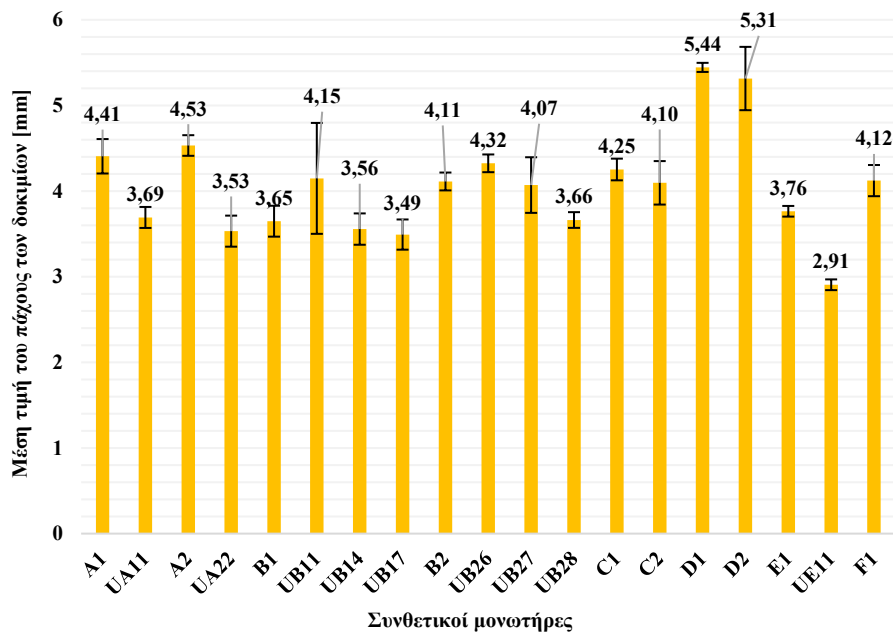
φαίνονται στο σχήμα 3-69 (β) και (γ). Παρά την απόκλιση του σχήματος των δοκιμίων από αυτά που απαιτεί το Πρότυπο ISO 37 [93], η εμπειρία από την εκτέλεση αυτής της δοκιμής έδειξε ότι αν το υλικό των δοκιμίων είναι επαρκές, ώστε τα δύο άκρα τους να μπορούν να «πιαστούν» (στερεωθούν) συμμετρικά από τις δαγκάνες της μηχανής εφελκυσμού, τότε τα αποτελέσματα θα είναι ακριβή ακόμη και με μη πλήρη δοκίμια (σχήμα 3-69 (δ)).



Σχήμα 3-69. α) Πλήρες - ολόκληρο δοκίμιο τύπου «αλτήρα (dumb-bell)» τύπου 2, β) και γ) μη πλήρη δοκίμια από τους μονωτήρες C2 και E1 λόγω έλλειψης υλικού (λήψη δοκιμίων από μικρά κυάθια), δ) συμμετρική άρμωση - στερέωση των δύο άκρων ενός μη πλήρους δοκιμίου στη μηχανή εφελκυσμού.

Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων αυτών λήφθηκαν 5 δοκίμια από έναν καινούριο μονωτήρα (από κάθε κατασκευαστή και από κάθε τύπο) και από έναν μεταχειρισμένο μονωτήρα από κάθε χρωματική ομάδα των πινάκων 3-5 και 3-6. Στο μέσο κάθε δοκιμίου από αυτά γινόταν μέτρηση του πάχους του. Έπειτα, λαμβανόταν κάθε φορά η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του πάχους κάθε πεντάδας δοκιμίων. Οι μέσες τιμές των παχών (και οι τυπικές αποκλίσεις τους) των δοκιμίων που εξετάστηκαν φαίνονται στο σχήμα 3-70.

Από το σχήμα 3-70 παρατηρούμε άλλη μία αναπόφευκτη απόκλιση που έπρεπε να γίνει από τις οδηγίες του Προτύπου ISO 37 [93]. Πιο συγκεκριμένα, το Πρότυπο αναφέρει ότι τα δοκίμια «αλτήρα (dumb-bell)» τύπου 2 θα πρέπει να έχουν πάχος ίσο με $2,0 \pm 0,2$ mm. Όπως φαίνεται από το σχήμα 3-70, αυτή η οδηγία του Προτύπου δεν έγινε εφικτό να εφαρμοστεί σε κανέναν από τους εξεταζόμενους μονωτήρες, καθώς τα κυάθια τους είχαν μεγαλύτερο πάχος από το ζητούμενο. Όμως, παρατηρώντας και αναλύοντας τη σχέση με την οποία υπολογίζεται η δύναμη εφελκυσμού μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι αυτή η απόκλιση από το Πρότυπο σχετικά με το πάχος των δοκιμίων δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, η δύναμη εφελκυσμού υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 3-7, σύμφωνα με το Πρότυπο ISO 37 [93].



Σχήμα 3-70. Μέσες τιμές του πάχους κάθε πεντάδας δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμή και οι τυπικές αποκλίσεις τους.

$$TS = \frac{F_{max}}{W*d} \quad (3-7)$$

Όπου:

TS: η δύναμη εφελκυσμού (N/mm²).

F_{max}: η μέγιστη δύναμη εφελκυσμού που καταγράφεται τη στιγμή που το δοκίμιο κόβεται (σκίζεται) (N).

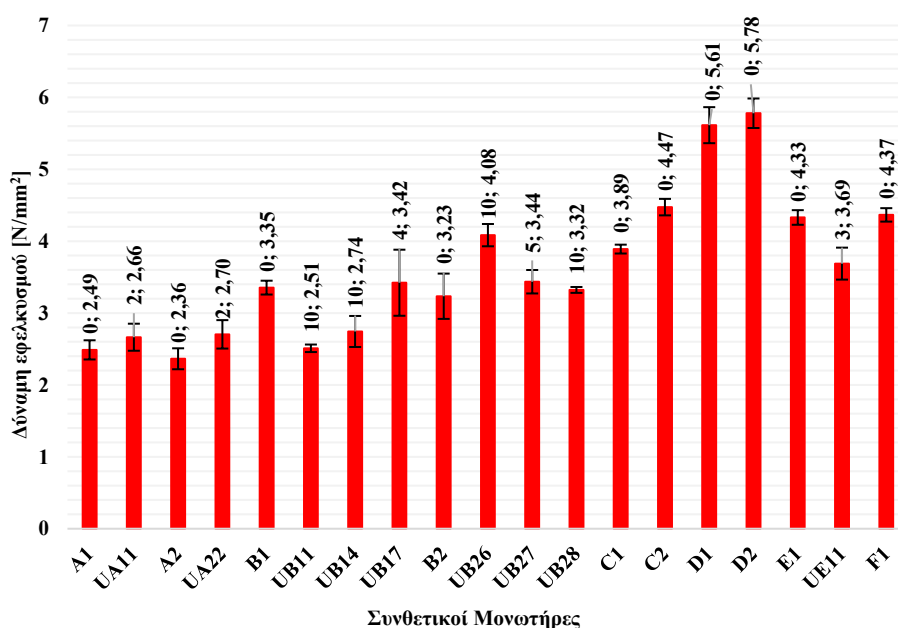
W: το πλάτος που έχει το δοκίμιο στο μέσον του, το οποίο είναι πάντα συγκεκριμένο για κάθε τύπο δοκιμίου (το καθορίζει το καλούπι κοπής) και για «αλτήρα (dumb-bell)» τύπου 2, που χρησιμοποιήθηκε, είναι πάντα ίσο με 4 mm (mm).

d: το πάχος του δοκιμίου (για «αλτήρα (dumb-bell)» τύπου 2 το Πρότυπο ISO 37 [93] απαιτεί πάχος 2,0 ± 0,2 mm) (mm).

Παρατηρώντας την εξίσωση 3-7 βλέπουμε ότι η δύναμη εφελκυσμού TS εξαρτάται τελικά από τους όρους F_{max} και d, αφού ο όρος W παραμένει σταθερός. Όμως, οι όροι F_{max} και d επηρεάζονται ανάλογα μεταξύ τους (δηλαδή καθώς το πάχος του δοκιμίου αυξάνεται, θα χρειάζεται μεγαλύτερη δύναμη για να «σπάσει – κοπεί», και αντιστρόφως). Με αυτόν τον τρόπο συμπεραίνουμε ότι παρά την απόκλιση που υπάρχει από τις οδηγίες του Προτύπου

σχετικά με το πάχος των δοκιμίων, περιμένουμε τα αποτελέσματα της δοκιμής να μην επηρεαστούν σημαντικά από αυτό.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής εφελκυσμού σε καινούριους και μεταχειρισμένους μονωτήρες φαίνονται στο σχήμα 3-71. Η δοκιμή εκτελέστηκε σε 5 δοκίμια από κάθε μονωτήρα και στη συνέχεια λαμβανόταν η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των μετρήσεων. Επίσης, στο σχήμα 3-71, ο πρώτος αριθμός στις ετικέτες της κάθε ράβδου δείχνει τα χρόνια λειτουργίας του κάθε μονωτήρα στο ηλεκτρικό δίκτυο, για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 3-71. Δύναμη εφελκυσμού για κάθε πεντάδα δοκιμίων του κάθε μονωτήρα και τυπική απόκλιση των μετρήσεων. Επίσης, στις ετικέτες της κάθε ράβδου φαίνονται τα χρόνια λειτουργίας των μονωτήρων στο δίκτυο (ο πρώτος αριθμός).

Από το σχήμα 3-71, παρατηρώντας τα αποτελέσματα της δοκιμής στους καινούριους μονωτήρες (αυτούς που δεν έχουν το γράμμα «U» μπροστά από το όνομα τους), μπορεί να εξαχθεί ένα εύρος τιμών, εντός του οποίου θα περιμένει κανείς το αποτέλεσμα εκτελώντας αυτή τη δοκιμή σε συνθετικούς μονωτήρες κατασκευασμένους με το ίδιο υλικό (HTV silicone rubber με πρόσμιξη ATH). Το εύρος αυτό είναι περίπου 2,4 – 6,0 N/mm².

Επίσης, σε συμφωνία με ό,τι αναφέρεται στο υποκεφάλαιο 2.2.1.5 της παρούσης διδακτορικής διατριβής σχετικά με προηγούμενες έρευνες, παρατηρούμε από το σχήμα 3-71 ότι δε μπορούμε να αποφανθούμε σχετικά με το πως επιδρά η γήρανση (τα χρόνια λειτουργίας στο δίκτυο) των μονωτήρων στα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής. Σε

κάποιους μονωτήρες οι τιμές της δύναμης εφελκυσμού αυξάνονται (UA11, UA22, UB17, UB26, UB27), σε άλλους παραμένουν σταθερές (UB28), και σε άλλους μειώνονται (UB11, UB14, UE11) σε σχέση με τους αντίστοιχους καινούριους μονωτήρες. Για να εξαχθεί συμπέρασμα σχετικά με αυτό το θέμα, θα μπορούσαν να ληφθούν πολλοί καινούριοι μονωτήρες, ίδιου υλικού και κατασκευαστικής διαδικασίας, οι οποίοι θα υποβάλλονταν σε ίδια αλλά διαφορετικής διάρκειας τεχνητή γήρανση και έπειτα από τη γήρανση θα υποβάλλονταν στη δοκιμή εφελκυσμού. Έτσι, θα μπορούσαν να ληφθούν αποτελέσματα της δύναμης εφελκυσμού με τους μονωτήρες να έχουν δεχθεί όλοι το ίδιο είδος τεχνητής γήρανσης, απλά διαφορετικής διάρκειας ο καθένας.

Το δεύτερο σκέλος αυτής της δοκιμής περιλάμβανε τον υπολογισμό της επιμήκυνσης κατά το σπάσιμο ή της μέγιστης επιμήκυνσης (elongation at break ή maximum elongation). Η επιμήκυνση κατά το σπάσιμο προκύπτει από την εξίσωση 3-8.

$$EB = \frac{100 * (L_B - L_0)}{L_0} \quad (3-8)$$

Όπου:

EB: η επιμήκυνση κατά το σπάσιμο (%).

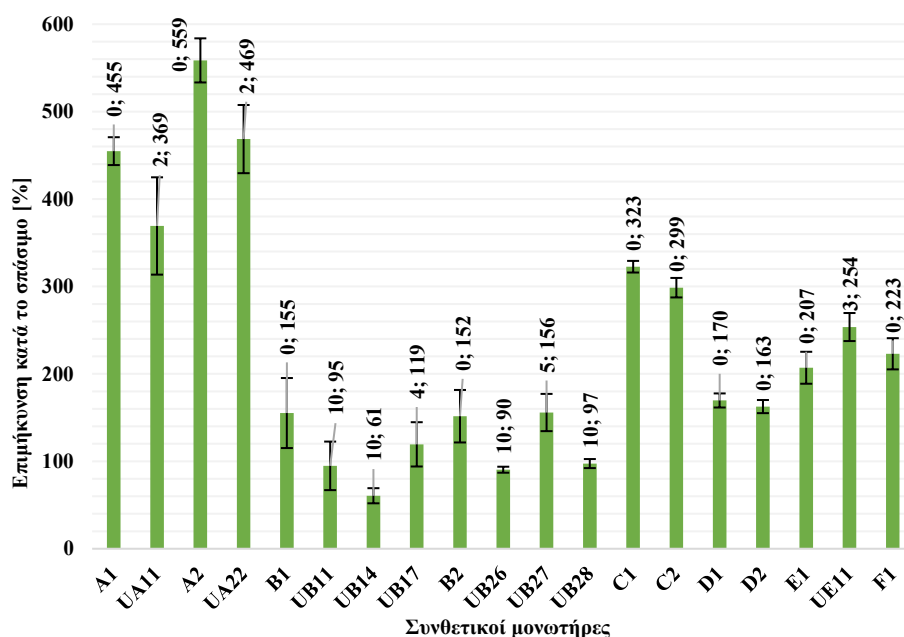
L_B: το μήκος του δοκιμίου τη στιγμή που αυτό σπάει (κόβεται) (mm).

L₀: το αρχικό μήκος του δοκιμίου πριν τη δοκιμή (mm).

Για κάθε πεντάδα δοκιμών υπολογιζόταν η επιμήκυνση κατά το σπάσιμο και στη συνέχεια η μέση τιμή αυτών των μετρήσεων και η τυπική απόκλιση, τα οποία φαίνονται στο σχήμα 3-72. Επίσης, στο σχήμα αυτό φαίνονται τα χρόνια λειτουργίας των μονωτήρων στο δίκτυο (το πρώτο νούμερο στις ετικέτες) για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων.

Στο σχήμα 3-72 παρατηρούμε ότι η επιμήκυνση κατά το σπάσιμο (ή μέγιστη επιμήκυνση) των καινούριων συνθετικών μονωτήρων κυμαίνεται στο εύρος 150% - 560%. Η πληροφορία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όταν πρόκειται να γίνουν μελλοντικά δοκιμές σε καινούριους συνθετικούς μονωτήρες κατασκευασμένους από το ίδιο υλικό, π.χ. κατά τις δοκιμές παραλαβής παρτίδας, σαν ένας οδηγός για το τι τιμές πρέπει να περιμένουμε από τη δοκιμή αυτή.

Επίσης, από το σχήμα 3-72 παρατηρούμε ότι φαίνεται να υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της γήρανσης των συνθετικών μονωτήρων και της επιμήκυνσης κατά το σπάσιμο. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα για τους μονωτήρες A1, A2, B1, B2, E1 και τα αποτελέσματα των γηρασμένων αντίστοιχων μονωτήρων, δηλαδή UA11, UA22, UB11, UB14, UB17, UB26, UB27, UB28 παρουσιάζονται στον πίνακα 3-23.



Σχήμα 3-72. Επιμήκυνση κατά το σπάσιμο για κάθε πεντάδα δοκιμίων του κάθε μονωτήρα και τυπική απόκλιση των μετρήσεων. Επίσης, στις ετικέτες της κάθε ράβδου φαίνονται τα χρόνια λειτουργίας των μονωτήρων στο δίκτυο (ο πρώτος αριθμός).

Πίνακας 3-23. Λόγοι των τιμών της επιμήκυνσης κατά το σπάσιμο των μεταχειρισμένων μονωτήρων σε σχέση με τους αντίστοιχους καινούριους.

Χρόνια στο δίκτυο	Γηρασμένος / καινούριος μονωτήρας	Λόγος επιμήκυνσης κατά το σπάσιμο (γηρασμένος / καινούριος μονωτήρας)
2	UA11 / A1	81%
2	UA22 / A2	84%
3	UE11 / E1	123%
4	UB17 / B1	77%
5	UB27 / B2	103%
10	UB11 / B1	61%
10	UB14 / B1	39%
10	UB26 / B2	60%
10	UB28 / B2	64%

Από τους υπολογισμούς του πίνακα 3-23 παρατηρούμε ότι υπάρχει μια εμφανής συσχέτιση μεταξύ της γήρανσης ενός συνθετικού μονωτήρα και της μέτρησης της επιμήκυνσης κατά

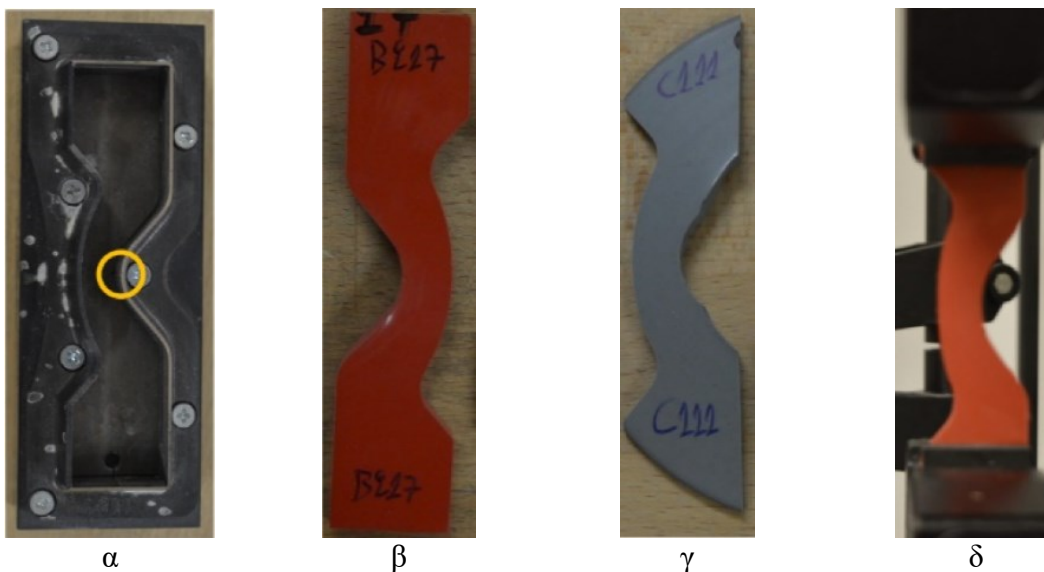
το σπάσιμο (ή μέγιστης επιμήκυνσης) στο μονωτικό του περίβλημα. Βλέπουμε ότι καθώς αυξάνονται τα χρόνια λειτουργίας ενός συνθετικού μονωτήρα στο δίκτυο, μειώνεται η τιμή της μέγιστης επιμήκυνσης του υλικού του. Εξαιρέση στο παραπάνω αποτελούν τα αποτελέσματα για τους μονωτήρες UE11 και UB27, οι οποίοι δεν έδωσαν τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Για να μπορέσουμε να έχουμε μια πιο σαφή εικόνα για το πως επηρεάζει η γήρανση τη μέγιστη επιμήκυνση του υλικού, θα πρέπει να συγκεντρωθούν πολλοί περισσότεροι μονωτήρες με διαφορετικά έτη λειτουργίας στο δίκτυο ο καθένας τους. Με αυτόν τον τρόπο, έχοντας ως δεδομένο την τιμή της μέτρησης της επιμήκυνσης κατά το σπάσιμο (ή μέγιστης επιμήκυνσης), θα μπορεί να γίνει μια εκτίμηση των χρόνων λειτουργίας ενός μονωτήρα στο δίκτυο.

Τέλος, από τα σχήματα 3-71 και 3-72 παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει κάποια σαφής συσχέτιση μεταξύ της δύναμης εφελκυσμού και της επιμήκυνσης κατά το σπάσιμο. Δηλαδή, γνωρίζοντας το ένα από τα δύο μεγέθη δε μπορεί κάποιος να προβλέψει το αποτέλεσμα του άλλου μεγέθους.

3.4.1.6 Δοκιμή προσδιορισμού της αντοχής σε σκίσιμο (Determination of tear strength)

Η δοκιμή προσδιορισμού της αντοχής σε σκίσιμο των συνθετικών μονωτήρων έχει διερευνηθεί βιβλιογραφικά στο υποκεφάλαιο 2.2.1.6 της παρούσης διδακτορικής διατριβής. Η δοκιμή αυτή, όπως έχει ήδη αναφερθεί, πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις οδηγίες του Προτύπου ISO 34-1 [104]. Κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών η θερμοκρασία του εργαστηρίου κυμαινόταν από 21 °C έως 22 °C. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με τη συσκευή εφελκυσμού Instron 3344. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή για τη διεξαγωγή των δοκιμών αυτών εφαρμόστηκε η Μέθοδος Γ του Προτύπου ISO 34-1 [104] και κατά συνέπεια τα δοκίμια ήταν τύπου «crescent». Οι διαστάσεις των δοκιμίων αυτών έχουν αναλυθεί στο υποκεφάλαιο 2.2.1.6 και προκύπτουν από τις οδηγίες του Προτύπου ISO 34-1 [104]. Πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό αυτών των δοκιμίων είναι μια μικρή εγκοπή (σχισμή), η οποία δημιουργείται κατά την προετοιμασία του δοκιμίου (σχήμα 2-12 – καταδεικνύεται από τον αριθμό «1») και η οποία πρέπει να έχει βάθος $1,0 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$, ώστε να γίνει σωστά η δοκιμή. Η παρασκευή των δοκιμίων και η δημιουργία αυτής της εγκοπής έγινε χρησιμοποιώντας μια χειροκίνητη συσκευή (σχήμα 3-68 (α)) και ένα μεταλλικό καλούπι κοπής (σχήμα 3-73 (α)). Η εγκοπή φαίνεται στο σχήμα 3-73 (α) μέσα σε κίτρινο κύκλο.

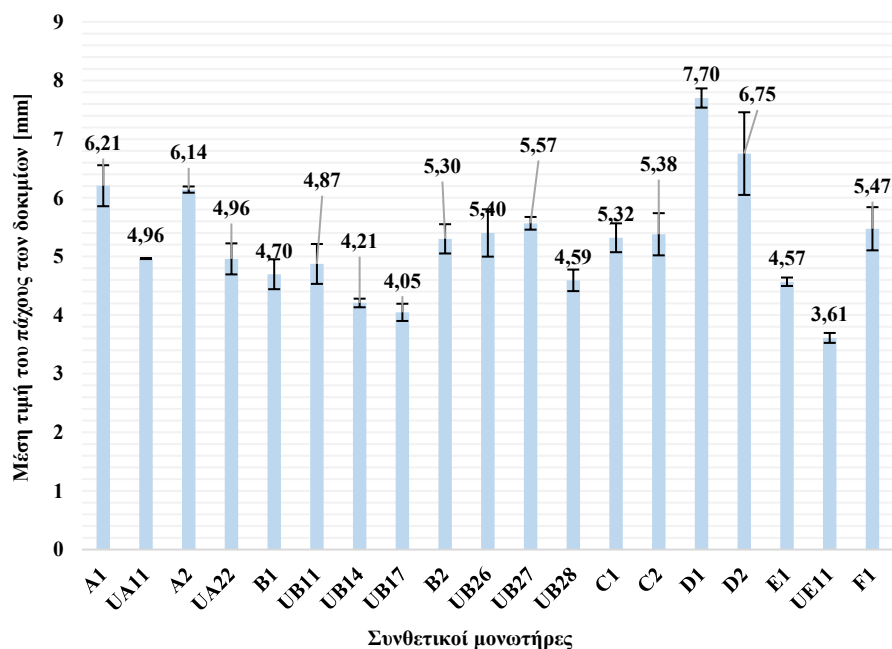
Το Πρότυπο ISO 34-1 [104] απαιτεί δοκίμια συγκεκριμένων διαστάσεων. Όταν όμως αυτή η δοκιμή πρόκειται να εφαρμοστεί σε δοκίμια που θα κοπούν από το μονωτικό υλικό συνθετικών μονωτήρων (τελικών προϊόντων), τότε κάποιες αποκλίσεις από το Πρότυπο είναι αναπόφευκτες. Μία τέτοια απόκλιση προκύπτει για το σχήμα των δοκιμίων που κόβονται. Σε αυτή τη διδακτορική διατριβή τα δοκίμια κόπηκαν από τα κιάθια των μονωτήρων, τα οποία είχαν διαφορετικό μέγεθος ανάλογα με τον κατασκευαστή και κατά συνέπεια κάποιες φορές δεν υπήρχε αρκετό υλικό ώστε να κοπεί ένα πλήρες – ολόκληρο δοκίμιο όπως αυτό απαιτείται από το Πρότυπο ISO 34-1 [104] (σχήμα 3-73 (β)). Έτσι, σε μια τέτοια περίπτωση μικρού κιαθίου προκύπτουν μη πλήρη δοκίμια όπως αυτό του σχήματος 3-73 (γ). Παρά την απόκλιση του σχήματος των δοκιμίων από αυτά που απαιτεί το Πρότυπο ISO 34-1 [104], η εμπειρία από την εκτέλεση αυτής της δοκιμής έδειξε ότι αν το υλικό των δοκιμίων είναι επαρκές, ώστε τα δύο άκρα τους να μπορούν να «πιαστούν» (στερεωθούν) συμμετρικά από τις δαγκάνες της μηχανής εφελκυσμού, τότε τα αποτελέσματα θα είναι ακριβή ακόμη και με μη πλήρη δοκίμια (σχήμα 3-73 (δ)).



Σχήμα 3-73. α) Μεταλλικό καλούπι που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή των δοκιμίων τύπου «crescent» από τα κιάθια των συνθετικών μονωτήρων και η εγκοπή που είναι απαραίτητη σε αυτή τη δοκιμή (μέσα σε κίτρινο κύκλο), β) πλήρες - ολόκληρο δοκίμιο τύπου «crescent», γ) μη πλήρες δοκίμιο από τον μονωτήρα C1 λόγω έλλειψης υλικού (λήψη δοκιμίων από μικρά κιάθια), δ) συμμετρική άρμωση - στερέωση των δύο άκρων ενός μη πλήρους δοκιμίου στη μηχανή εφελκυσμού.

Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων αυτών ελήφθησαν 5 δοκίμια από έναν καινούριο μονωτήρα (από κάθε κατασκευαστή και από κάθε τύπο) και από έναν μεταχειρισμένο μονωτήρα από κάθε χρωματική ομάδα των πινάκων 3-5 και 3-6. Σε κάθε δοκίμιο από αυτά γινόταν μέτρηση του πάχους του, στο σημείο της εγκοπής (επειδή σε αυτό το σημείο θα συνέβαινε το σκίσιμο κατά τη διάρκεια της δοκιμής). Έπειτα, λαμβανόταν κάθε φορά η

μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του πάχους κάθε πεντάδας δοκιμίων. Οι μέσες τιμές των παχών (και οι τυπικές αποκλίσεις τους) των δοκιμίων που εξετάστηκαν φαίνονται στο σχήμα 3-74.



Σχήμα 3-74. Μέσες τιμές του πάχους κάθε πεντάδας δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμή και οι τυπικές αποκλίσεις τους.

Από το σχήμα 3-74 παρατηρούμε άλλη μία αναπόφευκτη απόκλιση που έπρεπε να γίνει από τις οδηγίες του Προτύπου ISO 34-1 [104]. Πιο συγκεκριμένα, το Πρότυπο αναφέρει ότι τα δοκίμια τύπου «crescent» θα πρέπει να έχουν πάχος ίσο με $2,0 \pm 0,2$ mm. Όπως φαίνεται από το σχήμα 3-74 αυτή η οδηγία του Προτύπου δεν έγινε εφικτό να εφαρμοστεί σε κανέναν από τους εξεταζόμενους μονωτήρες, καθώς τα κυάθια τους είχαν μεγαλύτερο πάχος από το ζητούμενο. Όμως, παρατηρώντας και αναλύοντας τη σχέση με την οποία υπολογίζεται η αντοχή σε σκίσιμο μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι αυτή η απόκλιση από το Πρότυπο σχετικά με το πάχος των δοκιμίων δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, η αντοχή σε σκίσιμο υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 3-9, σύμφωνα με το Πρότυπο ISO 34-1 [104].

$$TRS = \frac{F_{max}}{t} \quad (3-9)$$

Όπου:

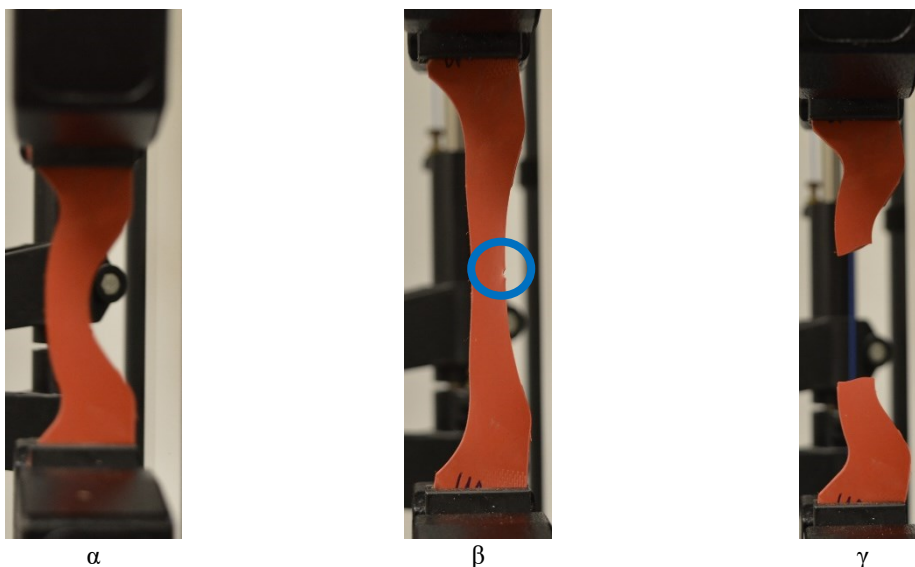
TRS: η αντοχή σε σκίσιμο (N/mm).

F_{max} : η μέγιστη δύναμη εφελκυσμού που καταγράφεται μέχρι τη στιγμή που το δοκίμιο σκίζεται (N).

t: το πάχος του δοκιμίου (για τύπο «crescent» το Πρότυπο ISO 34-1 [104] απαιτεί πάχος $2,0 \pm 0,2$ mm) (mm).

Παρατηρώντας την εξίσωση 3-9 βλέπουμε ότι η αντοχή σε σκίσιμο TRS εξαρτάται από τους όρους F_{max} και t, οι οποίοι επηρεάζονται ανάλογα μεταξύ τους (δηλαδή καθώς το πάχος του δοκιμίου αυξάνεται, θα χρειάζεται μεγαλύτερη δύναμη εφελκυσμού για να σκιστεί, και αντιστρόφως). Με αυτόν τον τρόπο συμπεραίνουμε ότι παρά την απόκλιση που υπάρχει από τις οδηγίες του Προτύπου ISO 34-1 [104] σχετικά με το πάχος των δοκιμίων, περιμένουμε τα αποτελέσματα της δοκιμής να μην επηρεαστούν σημαντικά από αυτό.

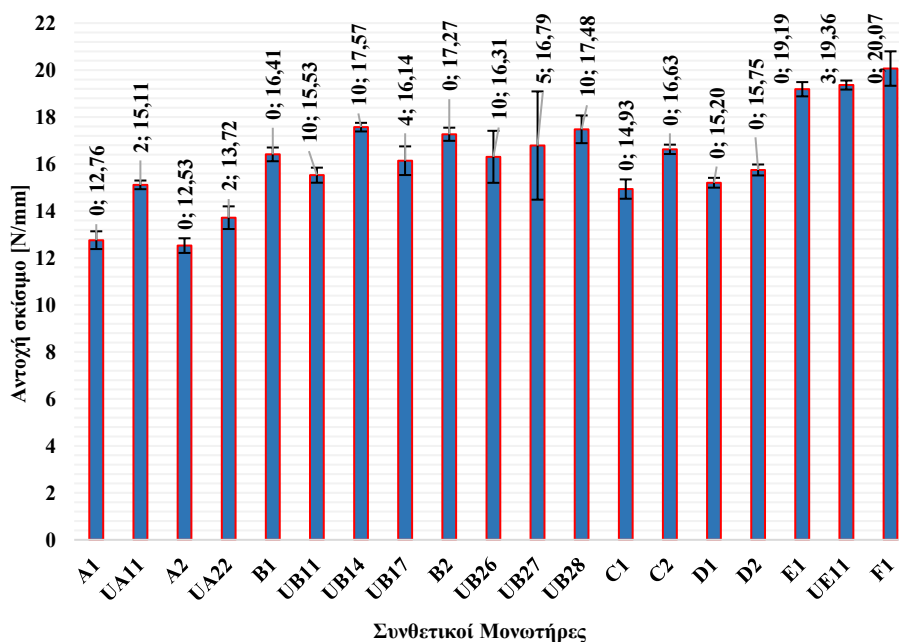
Μετά την παρασκευή των δοκιμίων αυτά τοποθετούνται στη συσκευή, η οποία «τραβά» τα δοκίμια μέχρι να σκιστούν. Τα στάδια αυτής της δοκιμής φαίνονται στο σχήμα 3-75. Επίσης, στο σχήμα 3-75 (β) φαίνεται σε μπλε κύκλο η εγκοπή – σχισμή που έχει δημιουργηθεί στο δοκίμιο από το μεταλλικό καλούπι κοπής των δοκιμίων. Το σκίσιμο του δοκιμίου, όπως προαναφέρθηκε συμβαίνει σε αυτήν την εγκοπή – σχισμή (σχήμα 3-75 (γ)).



Σχήμα 3-75. Στάδια της δοκιμής σκισίματος. α) πρώτο στάδιο, β) δεύτερο στάδιο, όπου φαίνεται με μπλε κύκλο η εγκοπή - σχισμή που δημιουργείται από το μεταλλικό καλούπι κοπής και γ) τρίτο στάδιο, όπου τελικά το δοκίμιο σκίζεται.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής αντοχής σε σκίσιμο σε καινούριους και μεταχειρισμένους μονωτήρες φαίνονται στο σχήμα 3-76. Η δοκιμή εκτελέστηκε σε 5 δοκίμια από κάθε

μονωτήρα και στη συνέχεια λαμβανόταν η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των μετρήσεων. Επίσης, στο σχήμα 3-76, στις ετικέτες της κάθε ράβδου φαίνονται τα χρόνια λειτουργίας του κάθε μονωτήρα στο ηλεκτρικό δίκτυο (το πρώτο νούμερο) για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 3-76. Αντοχή σε σκίσιμο για κάθε πεντάδα δοκιμών του κάθε μονωτήρα και τυπική απόκλιση των μετρήσεων. Επίσης, στις ετικέτες της κάθε ράβδου φαίνονται τα χρόνια λειτουργίας των μονωτήρων στο δίκτυο (ο πρώτος αριθμός).

Από το σχήμα 3-76, παρατηρώντας τα αποτελέσματα της δοκιμής στους καινούριους μονωτήρες (αυτούς που δεν έχουν το γράμμα «U» μπροστά από το όνομα τους), μπορεί να εξαχθεί ένα εύρος τιμών που θα περιμένει κανείς εκτελώντας αυτή τη δοκιμή σε συνθετικούς μονωτήρες κατασκευασμένους με το ίδιο υλικό (HTV silicone rubber με πρόσμιξη ATH). Το εύρος αυτό είναι περίπου 12,5 – 20,0 N/mm. Η πληροφορία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όταν πρόκειται να γίνουν μελλοντικά δοκιμές σε καινούριους συνθετικούς μονωτήρες κατασκευασμένους από το ίδιο υλικό, π.χ. κατά τις δοκιμές παραλαβής παρτίδας, ως ένας οδηγός για το τι τιμές πρέπει να περιμένουμε από τη δοκιμή αυτή.

Επίσης, σε συμφωνία με ό,τι αναφέρεται στο υποκεφάλαιο 2.2.1.6 της παρούσης διδακτορικής διατριβής σχετικά με προηγούμενες έρευνες, παρατηρούμε από το σχήμα 3-76 ότι δε μπορούμε να αποφανθούμε σχετικά με το πως επιδρά η γήρανση (τα χρόνια λειτουργίας στο δίκτυο) των μονωτήρων στα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής. Σε

κάποιους μονωτήρες οι τιμές της αντοχής σε σκίσιμο αυξάνονται (UA11, UA22, UB14, UB28), σε άλλους παραμένουν σχεδόν σταθερές (UB17, UE11), και σε άλλους μειώνονται (UB11, UB26, UB27) σε σχέση με τους αντίστοιχους καινούριους μονωτήρες. Για να εξαχθεί συμπέρασμα σχετικά με αυτό το θέμα, θα μπορούσαν να ληφθούν πολλοί καινούριοι μονωτήρες, ίδιου υλικού και κατασκευαστικής διαδικασίας, οι οποίοι θα υποβληθούν σε ίδια αλλά διαφορετικής διάρκειας τεχνητή γήρανση και έπειτα από τη γήρανση θα υποβάλλονται στη δοκιμή αντοχής σε σκίσιμο. Έτσι, θα μπορέσουν να ληφθούν αποτελέσματα της αντοχής σε σκίσιμο με τους μονωτήρες να έχουν δεχθεί όλοι το ίδιο είδος τεχνητής γήρανσης, απλά διαφορετικής διάρκειας ο καθένας. Οι μονωτήρες που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη διδακτορική διατριβή είχαν ληφθεί από διάφορα σημεία του ελληνικού ηλεκτρικού δικτύου διανομής και δεν είναι δυνατόν να γνωρίζουμε το είδος και την ένταση της γήρανσης από την οποία καταπονήθηκαν.

3.4.1.7 Φασματοσκοπία υπέρυθρων μετασχηματισμού Fourier (Fourier transform infrared spectroscopy – FTIR)

Η δοκιμή αυτή έχει αναλυθεί βιβλιογραφικά στο υποκεφάλαιο 2.2.1.7 της παρούσης διδακτορικής διατριβής. Για τη συγκεκριμένη δοκιμή σε συνθετικούς μονωτήρες δεν υπάρχει κάποιο Πρότυπο που να περιέχει τη διαδικασία της δοκιμής, αλλά μπορεί κανείς να συμβουλευτεί την τεχνική οδηγία 595 της Cigre, η οποία είναι ιδιαίτερα λεπτομερής [113].

Τα δοκίμια για τη μέτρηση αυτή λήφθηκαν από τα κυάθια των εξεταζόμενων μονωτήρων χρησιμοποιώντας ένα μαχαίρι. Πιο συγκεκριμένα, από τους **καινούριους μονωτήρες** λήφθηκαν δοκίμια από: α) την επιφάνεια του υλικού (συμβολίζεται με «S» από την αγγλική λέξη Surface), αφού είχε καθαριστεί πρώτα με ισοπροπυλική αλκοόλη και β) το εσωτερικό του υλικού (συμβολίζεται με «C» από την αγγλική λέξη Core). Από τους **μεταχειρισμένους μονωτήρες** λήφθηκαν δοκίμια από: α) την επιφάνεια του υλικού όπως ήταν, χωρίς να γίνει καθαρισμός της ρύπανσης από αυτήν (συμβολίζεται με «P» από την αγγλική λέξη Pollution), β) την επιφάνεια του υλικού αφού προηγήθηκε καθαρισμός της ρύπανσης με ισοπροπυλική αλκοόλη (συμβολίζεται με «S» από την αγγλική λέξη Surface) και γ) το εσωτερικό του υλικού (συμβολίζεται με «C» από την αγγλική λέξη Core). Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων αυτών ελήφθησαν 3 δοκίμια «S» και 3 δοκίμια «C» (για λόγους επαναληψιμότητας) από έναν καινούριο μονωτήρα από κάθε κατασκευαστή και από κάθε τύπο και 3 δοκίμια «P», 3 δοκίμια «S» και 3 δοκίμια «C» από έναν μεταχειρισμένο

μονωτήρα από κάθε χρωματική ομάδα των πινάκων 3-5 και 3-6. Το αποτέλεσμα της δοκιμής αυτής ήταν το διάγραμμα διαπερατότητας (φάσμα) του υλικού συναρτήσει του κυματαριθμού. Τα διαγράμματα διαπερατότητας (φάσματα) του υλικού συναρτήσει του κυματαριθμού που προέκυψαν από αυτές τις δοκιμές φαίνονται στο **Παράρτημα Α**, στα σχήματα Α-1 έως Α-38. Το φασματόμετρο που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκεκριμένη μέτρηση ήταν το Alpha-E Bruker FTIR Spectrometer (φαίνεται στο σχήμα 3-77), το οποίο έκανε 24 σκαναρίσματα της επιφάνειας του κάθε δοκιμίου και τα συνένωνε μεταξύ τους, ώστε να είναι πιο ακριβής η μέτρηση. Η διάρκεια της δοκιμής ήταν λιγότερο από 2 λεπτά.



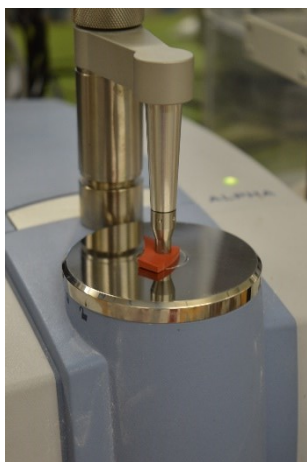
α



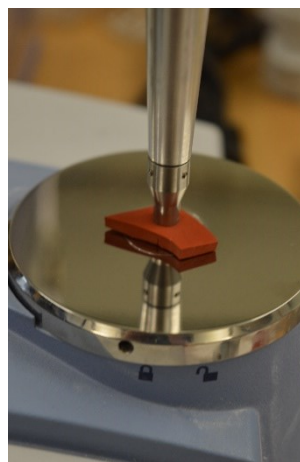
β

Σχήμα 3-77. Φασματόμετρο Alpha-E Bruker FTIR Spectrometer που χρησιμοποιήθηκε κατά τη δοκιμή α) μπροστινή όψη, β) πλάγια όψη.

Τα δοκίμια τοποθετούνται στη στρογγυλή γυάλινη επιφάνεια του φασματόμετρου με την επιφάνεια προς μέτρηση στραμμένη προς την κάτω πλευρά, τοποθετείται επάνω τους ο μεταλλικός βραχίονας (σχήμα 3-78) και έπειτα πραγματοποιείται η μέτρηση μέσω του λογισμικού του φασματόμετρου.



α



β

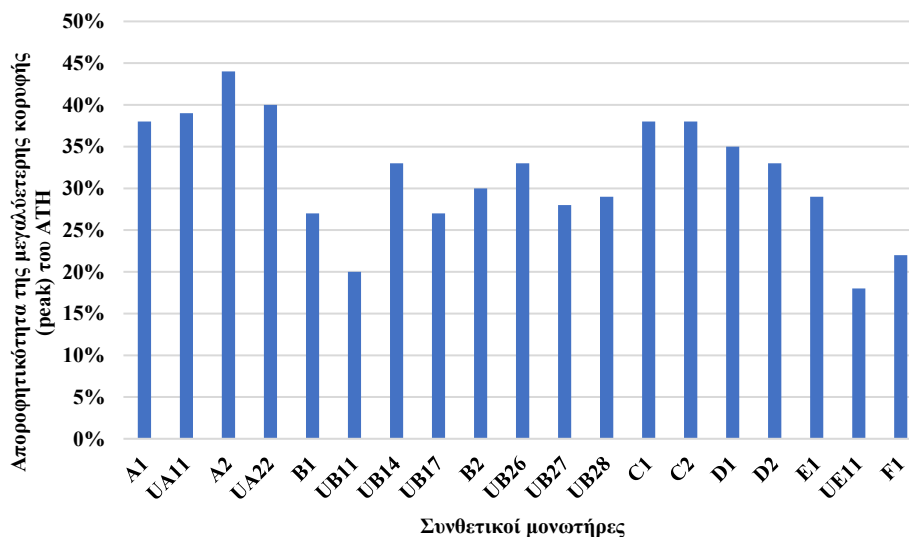
Σχήμα 3-78. Τοποθέτηση του δοκιμίου στο φασματόμετρο για την εκτέλεση της δοκιμής.

Μία πολύ σημαντική παρατήρηση που προκύπτει από τα αποτελέσματα αυτής της δοκιμής, είναι ότι μπορεί κανείς πολύ γρήγορα, με μία απλή οπτική σύγκριση των σχημάτων A-1 έως A-38 με τα αντίστοιχα φάσματα αναφοράς, όπως αυτών των σχημάτων 2-15, 2-16 και 2-17 να συμπεράνει το τι υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του μονωτικού περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων, αλλά και για την κατασκευαστική διαδικασία. Συγκεκριμένα, από τα σχήματα A-1 έως A-38 φαίνεται ότι όλοι οι εξεταζόμενοι μονωτήρες έχουν παρόμοια μορφή με το σχήμα 2-15 και οι κορυφές που εμφανίζονται στα διαγράμματα είναι ίδιες με αυτές που αναφέρονται στον πίνακα 2-2. Άρα, εύκολα και γρήγορα προκύπτει το συμπέρασμα ότι όλοι οι εξεταζόμενοι μονωτήρες ήταν κατασκευασμένοι από HTV σιλικονούχο καουτσούκ (Silicone Rubber) με πρόσμιξη ATH. Συμπερασματικά, με τη δοκιμή αυτή μπορεί να γίνει μια γρήγορη και εύκολη επαλήθευση του υλικού των συνθετικών μονωτήρων.

Επίσης, παρατηρώντας τα φάσματα που προέκυψαν από τα δοκίμια των καινούριων μονωτήρων (σχήματα A-1 έως A-11) είναι προφανές ότι όταν η μέτρηση γινόταν στα δοκίμια «S», που ελήφθησαν από την επιφάνεια των μονωτήρων, οι κορυφές των φασμάτων είναι πιο μικρές από αυτές των δοκιμών «C», που ελήφθησαν από το εσωτερικό του υλικού, παρόλο που τα δοκίμια «S» είχαν καθαριστεί πριν τις μετρήσεις με ισοπροπυλική αλκοόλη. Αυτό πιθανόν συμβαίνει λόγω κάποιας εναπομείνουσας ρύπανσης επάνω στην επιφάνεια των μονωτήρων. Οπότε, όταν πρόκειται για καινούριους συνθετικούς μονωτήρες είναι σημαντικό η μέτρηση αυτή να γίνεται σε δοκίμια «C», καθώς έτσι υπάρχει μια πιο σαφής εικόνα για τη σύσταση του υλικού τους.

Ακόμη, παρατηρώντας τα σχήματα A-1 έως A-11 και από τα σχήματα A-12 έως A-38 μονάχα αυτά που έχουν προκύψει από «C» δοκίμια, δηλαδή από το εσωτερικό του υλικού, μπορούμε να έχουμε μια ποιοτική εκτίμηση για την ποσότητα του πληρωτικού υλικού ATH (aluminium trihydrate) που υπάρχει στους συνθετικούς μονωτήρες. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι σημαντικό οι συνθετικοί μονωτήρες να περιέχουν πληρωτικό υλικό ATH (aluminium trihydrate) για να έχουν αντοχή στο φαινόμενο της δημιουργίας αγωγίμων καναλιών άνθρακα και διάβρωσης (tracking and erosion). Από τα σχήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω, συλλέχθηκαν οι μεγαλύτερες κορυφές από αυτές που αντιστοιχούν στο υλικό ATH και απεικονίζονται στο σχήμα 3-79. Τονίζεται εδώ ότι ο κατακόρυφος άξονας του σχήματος 3-79 δεν αναφέρεται στο ποσοστό περιεκτικότητας του ATH μέσα στο υλικό, αλλά στο κατά πόσο η υπέρυθη ακτινοβολία του φασματομέτρου

απορροφήθηκε από το υλικό. Όσο πιο πολύ απορροφήθηκε (άρα όσο μεγαλύτερη είναι η κορυφή), τόσο περισσότερο ATH υπάρχει στο υλικό, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία που αναφέρεται στο υποκεφάλαιο 2.2.1.7.



Σχήμα 3-79. Ποιοτική εκτίμηση της ποσότητας του προσθετικού υλικού ATH. Τα αποτελέσματα είναι από τα φάσματα που προέκυψαν από τα «C» δοκίμια των μονωτήρων.

Από το σχήμα 3-79 παρατηρούμε ότι οι κατασκευαστές A, C και D χρησιμοποιούσαν μείγμα υλικού με περισσότερο πληρωτικό υλικό ATH από τους κατασκευαστές B, E και F. Αν συγκρίνουμε αυτά τα αποτελέσματα με τα αποτελέσματα της δοκιμής του κεκλιμένου επιπέδου (υποκεφάλαιο 3.4.1.4.1), η οποία χρησιμοποιείται για να διαφανεί η αντοχή του υλικού στο φαινόμενο της δημιουργίας αγωγίων καναλιών άνθρακα και διάβρωσης (tracking and erosion), παρατηρούμε ότι στη δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου απέτυχε 1 στα 5 δοκίμια από μονωτήρα UE1, γεγονός που συμφωνεί με τα αποτελέσματα του σχήματος 3-79, ότι δηλαδή ο κατασκευαστής E έβαζε μικρότερη ποσότητα ATH. Από την άλλη μεριά, στη δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου απέτυχαν επίσης 1 στα 5 δοκίμια από μονωτήρα C2 (προ βρασμού) και 2 στα 5 από μονωτήρα C1 (κατόπιν βρασμού). Αυτό δε συμφωνεί με τα αποτελέσματα του σχήματος 3-79, στα οποία ο κατασκευαστής C φαίνεται να χρησιμοποιεί αρκετό ATH στο υλικό του. Αυτό ίσως να συμβαίνει γιατί το ATH στο υλικό του κατασκευαστή C δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο με αποτέλεσμα σε κάποια σημεία να μην έχει την απαιτούμενη ποσότητα. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι είναι σημαντικό να εκτελείται και η δοκιμή του κεκλιμένου επιπέδου, αλλά και η FTIR για να υπάρχει πιο σαφής εικόνα. Επίσης, αναφέρεται εδώ ότι στο επόμενο υποκεφάλαιο της παρούσης διδακτορικής διατριβής (3.4.1.8) θα παρουσιαστούν

τα ποσοστά συγκέντρωσης του ΑΤΗ μέσα στο υλικό των εξεταζόμενων μονωτήρων με τον τρόπο που περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 2.2.1.8 μέσω της δοκιμής θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης (TGA).

Επιπλέον μέσω της δοκιμής FTIR μπορεί κανείς να λάβει συμπεράσματα σχετικά με τη γήρανση του υλικού. Παρατηρώντας τα σχήματα A-1 έως και A-38 και συγκρίνοντας τα φάσματα μονωτήρων ίδιων κατασκευαστών με διαφορετικά χρόνια λειτουργίας στο ηλεκτρικό δίκτυο (συγκεκριμένα τα φάσματα από δοκίμια «C» των καινούριων μονωτήρων με τα φάσματα «S» των μεταχειρισμένων), φαίνεται ότι καθώς αυξάνονται τα χρόνια λειτουργίας στο δίκτυο, δηλαδή καθώς το υλικό γηράσκει όλο και περισσότερο, οι κορυφές που προκύπτουν στα φάσματα FTIR εμφανίζονται όλο και μικρότερες (για παράδειγμα σύγκρινε σχήματα: A-3 (B1 - καινούριος), A-25 (UB17 – 4 χρόνια στο δίκτυο) και A-19 (UB11 – 10 χρόνια στο δίκτυο). Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένας δείκτης για την εκτίμηση του πόσο έχει αλλοιωθεί το υλικό λόγω της γήρανσης. Δηλαδή, οι διαχειριστές των δικτύων θα μπορούσαν, αφότου αγοράσουν μια παρτίδα καινούριων μονωτήρων, να εκτελέσουν τη δοκιμή FTIR σε δοκίμια «C» του μονωτικού περιβλήματος τους και να κρατήσουν τα φάσματα που θα προκύψουν σαν φάσματα αναφοράς. Έπειτα, όταν θέλουν να εξετάσουν – διερευνήσουν τους μονωτήρες αυτούς μετά από χρόνια λειτουργίας στο δίκτυο, να εκτελούν τη δοκιμή FTIR και να συγκρίνουν τα φάσματα με τα φάσματα αναφοράς. Έτσι θα έχουν μια εικόνα για το πόσο έχει αλλοιωθεί το υλικό των μονωτήρων που χρησιμοποιούν. Επίσης, εξετάζοντας διαφορετικούς κατασκευαστές θα μπορούν να αποφανθούν για το ποιανού κατασκευαστή οι μονωτήρες υφίστανται τη μικρότερη αλλοίωση στο υλικό τους όσο περνούν τα χρόνια (άρα ποιος κατασκευαστής είναι πιο αξιόπιστος). Απαραίτητη προϋπόθεση βέβαια για να γίνει αυτό είναι οι μεταχειρισμένοι μονωτήρες, που θα εξετάζονται, να έχουν τα ίδια χρόνια λειτουργίας μεταξύ τους και επίσης να αποξηλώνονται από το ίδιο σημείο του δικτύου (ώστε να διασφαλίζεται η παρόμοια γήρανση τους και η παρόμοια ρύπανση τους).

Σε συνέχεια των παρατηρήσεων που περιγράφονται στην προηγούμενη παράγραφο, άλλη μία παρατήρηση που προκύπτει από τα φάσματα FTIR του παρατήματος Α των δοκιμίων «C» για τους καινούριους μονωτήρες και των δοκιμίων «C» για τους μεταχειρισμένους, είναι ότι αυτά είναι σχεδόν ίδια (ανά κατασκευαστή). Επομένως, ακόμα και να μην υπάρχουν τα φάσματα αναφοράς των μονωτήρων από όταν αυτοί ήταν καινούριοι, μπορούν να γίνουν συγκρίσεις μεταξύ των φασμάτων «C» και των φασμάτων «S» για τον

ίδιο μεταχειρισμένο μονωτήρα και να προκύψουν ικανοποιητικά αποτελέσματα σχετικά με τη γήρανση του υλικού. Επίσης, μπορούν να γίνουν συγκρίσεις μεταξύ των φασμάτων «C» και των φασμάτων «P» για τον ίδιο μεταχειρισμένο μονωτήρα και να προκύψουν παρατηρήσεις για τη ρύπανση σε συνδυασμό με τη γήρανση του υλικού. Αυτές οι παρατηρήσεις είναι πιο δύσκολο να αναλυθούν και να εξηγηθούν, καθώς εμπλέκονται δύο φαινόμενα (ρύπανση και γήρανση).

3.4.1.8 Θερμοβαρυμετρική ανάλυση (*Thermogravimetric analysis – TGA*)

Η δοκιμή της θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης έχει επεξηγηθεί βιβλιογραφικά στο υποκεφάλαιο 2.2.1.8 της παρούσης διδακτορικής διατριβής. Η δοκιμή αυτή εκτελέστηκε σύμφωνα με τη συμβατική διαδικασία του προτύπου ISO 11358-1 [121] (όπου η θερμοκρασία αυξάνεται συνεχώς – έχει επεξηγηθεί στο υποκεφάλαιο 2.2.1.8), αλλά και την τεχνική οδηγία 595 της Cigre [113].

Τα δοκίμια για τη διεξαγωγή των μετρήσεων αυτών λήφθηκαν από το εσωτερικό του μονωτικού περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων (από τα κυάθια των μονωτήρων) με τη βοήθεια ενός μαχαιριού. Για τη διεξαγωγή καλύτερων μετρήσεων με μικρότερες αποκλίσεις έγινε προσπάθεια η μάζα των δοκιμίων να είναι στο εύρος $15\text{mg} \pm 1\text{mg}$. Τα δοκίμια ήταν ενιαία κομμάτια της παραπάνω μάζας και όχι διαμελισμένα σε πολλά μικρά κομμάτια.

Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων αυτών ελήφθησαν 3 δοκίμια (για λόγους επαναληψιμότητας) από έναν καινούριο μονωτήρα από κάθε κατασκευαστή και από κάθε τύπο και 3 δοκίμια από έναν μεταχειρισμένο μονωτήρα από κάθε χρωματική ομάδα των πινάκων 3-5 και 3-6 (οπότε η δοκιμή εκτελέστηκε 3 φορές για τον κάθε μονωτήρα – 1 φορά για κάθε δοκίμιο). Το αποτέλεσμα της δοκιμής αυτής ήταν το διάγραμμα της ποσοστιαίας απώλειας βάρους του δοκιμίου συναρτήσει της θερμοκρασίας του. Τα διαγράμματα που προέκυψαν από αυτές τις δοκιμές φαίνονται στο **Παράρτημα Β**, στα σχήματα B-1 έως B-19. Κατά τη δοκιμή αυτή η θερμοκρασία του δοκιμίου αυξανόταν συνεχώς ξεκινώντας από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος ($21\text{ }^{\circ}\text{C}$) μέχρι περίπου στους $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, με ρυθμό αύξησης $20\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{min}$ και συνεχώς μετριόταν το βάρος του. Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκεκριμένη μέτρηση ήταν η TGA 2050 της TA Instruments, η οποία φαίνεται στο σχήμα 3-80. Η διάρκεια της δοκιμής ήταν περίπου 40 λεπτά για κάθε δοκίμιο.



Σχήμα 3-80. Συσκευή εκτέλεσης της δοκιμής θερμοβαρουμετρικής ανάλυσης (TGA 2050 της TA Instruments).

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών φαίνονται συγκεντρωμένα στον πίνακα 3-24, και αναλυτικά στα σχήματα Β-1 έως Β-19 του παραρτήματος Β.

Πίνακας 3-24. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεων θερμοβαρουμετρικής ανάλυσης (TGA) στους συνθετικούς μονωτήρες που εξετάστηκαν.

Μονωτήρας	Χρόνια στο δίκτυο	Πτητικό περιεχόμενο [βάρος %] Θεσκιν. - 200°C		Απώλεια μάζας κατά την 1η φάση [βάρος %] Θεσκιν. - ~350°C		Απώλεια μάζας κατά την 2η φάση [βάρος %] Θεσκιν. - Θετλ.	
		Μέση τιμή	Τυπ. Απόκλιση	Μέση τιμή	Τυπ. Απόκλιση	Μέση τιμή	Τυπ. Απόκλιση
A1	0	0,20%	0,06%	14,11%	0,14%	52,73%	0,53%
UA11	2	0,14%	0,04%	14,29%	0,09%	52,33%	0,10%
A2	0	0,21%	0,00%	14,76%	0,16%	52,10%	0,20%
UA22	2	0,13%	0,09%	14,18%	0,19%	52,80%	0,16%
B1	0	0,67%	0,01%	11,45%	0,16%	50,36%	0,24%
UB11	10	0,69%	0,02%	15,07%	0,01%	48,03%	0,04%
UB14	10	0,60%	0,11%	14,12%	0,06%	47,94%	0,07%
UB17	4	0,71%	0,01%	11,74%	0,03%	50,45%	0,10%
B2	0	0,72%	0,06%	11,93%	0,16%	50,77%	0,25%
UB26	10	0,62%	0,06%	14,29%	0,19%	48,45%	0,21%
UB27	5	0,66%	0,03%	11,70%	0,08%	50,46%	0,11%
UB28	10	0,63%	0,04%	12,49%	0,05%	50,87%	0,07%
C1	0	0,68%	0,02%	14,57%	0,05%	52,50%	0,07%
C2	0	0,63%	0,07%	14,62%	0,09%	52,63%	0,20%
D1	0	0,83%	0,03%	17,54%	0,03%	46,74%	0,27%
D2	0	0,85%	0,01%	16,80%	0,13%	46,31%	0,31%
E1	0	0,17%	0,01%	15,02%	0,06%	49,60%	0,12%
UE11	3	0,42%	0,01%	13,95%	0,13%	50,21%	0,14%
F1	0	0,19%	0,01%	15,15%	0,06%	49,00%	0,13%

Στον πίνακα 3-24 φαίνονται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις (3 δοκίμια για κάθε μονωτήρα) των απωλειών μάζας των σχημάτων B-1 έως B-19. Αυτό που αναφέρεται στον πίνακα ως «πτητικό περιεχόμενο» είναι συνήθως κάποιες τοξίνες ή ακαθαρσίες που υπάρχουν μέσα στο υλικό και αποσυντίθεται σε θερμοκρασία περίπου 200 °C. Έπειτα, φαίνονται οι απώλειες μάζας κατά την 1^η (αποσύνθεση του πληρωτικού υλικού aluminium trihydrate (ATH)) και τη 2^η φάση (αποσύνθεση – πυρόλυση του PDMS), οι οποίες έχουν εξηγηθεί αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 2.2.1.8.

Το πρώτο πολύ σημαντικό συμπέρασμα που εξάγεται από αυτή τη δοκιμή είναι η επαλήθευση ότι το υλικό είναι το HTV silicone rubber με πληρωτικό υλικό ATH. Αυτό μπορεί να γίνει με μια απλή σύγκριση των διαγραμμάτων B-1 έως B-19 με τα κάποια διαγράμματα αναφοράς για αυτό το υλικό, όπως αυτά που φαίνονται στα σχήματα 2-21 και 2-22. Από τη σύγκριση αυτή παρατηρούμε ότι το υλικό όλων των εξεταζόμενων μονωτήρων είναι το HTV silicone rubber με πληρωτικό ATH. Επισημαίνεται εδώ ότι το συγκεκριμένο συμπέρασμα είχε προκύψει και στο υποκεφάλαιο 3.4.1.7 μέσω της δοκιμής FTIR.

Συνεχίζοντας, μέσω αυτής της δοκιμής, μπορεί να γίνει εκτίμηση της περιεκτικότητας του πληρωτικού υλικού ATH μέσα στο υλικό. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας την παρατήρηση του υποκεφαλαίου 2.2.1.8 (σχήμα 2-24) ότι το μόριο του aluminium trihydrate (ATH) αποτελείται από περίπου 34,6% νερό και της στήλης «Απώλεια μάζας κατά την 1η φάση» του πίνακα 3-24, μπορεί να γίνει μια εκτίμηση της περιεκτικότητας του ATH μέσα στο μονωτικό περίβλημα των συνθετικών μονωτήρων χρησιμοποιώντας απλές αναλογίες. Στο σχήμα 3-81 φαίνεται η περιεκτικότητα του ATH μέσα στο μονωτικό περίβλημα του κάθε μονωτήρα, όπως αυτή προέκυψε χρησιμοποιώντας την παραπάνω μεθοδολογία.

Από το σχήμα 3-81, βλέποντας τα αποτελέσματα για τους καινούριους μονωτήρες (αυτούς χωρίς το U στην ονομασία τους), παρατηρούμε ότι η περιεκτικότητα του πληρωτικού υλικού aluminium trihydrate (ATH) μέσα στο σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) του μονωτικού περιβλήματος τους κυμαίνεται από περίπου 33% έως περίπου 51%.

Επίσης, από το σχήμα 3-81 φαίνεται ότι η περιεκτικότητα σε ATH των κατασκευαστών συνθετικών μονωτήρων που εξετάστηκαν φθίνει ανάλογα με τον κατασκευαστή σύμφωνα με την ακόλουθη σειρά: D, F, E, C, A, B. Το συμπέρασμα αυτό δε συμφωνεί απόλυτα με

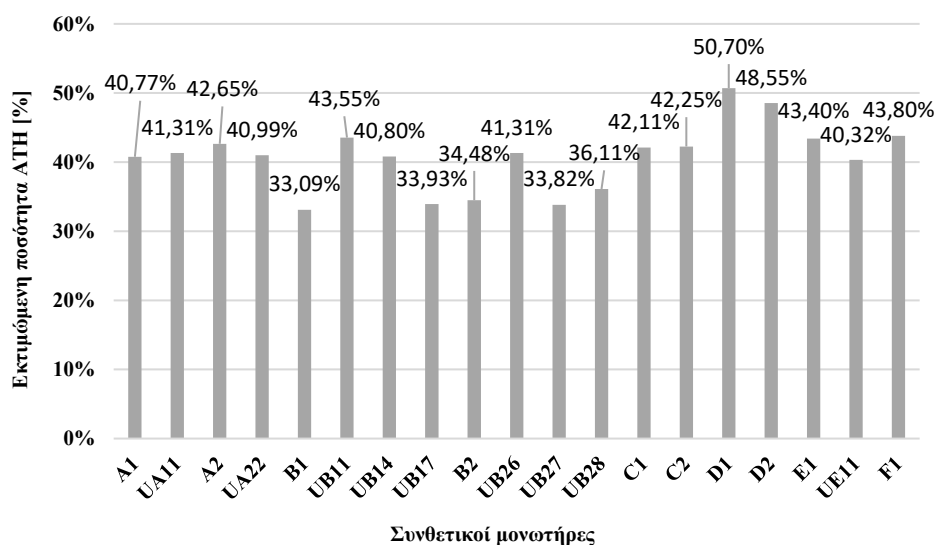
τα αποτελέσματα της δοκιμής του υποκεφαλαίου 3.4.1.7 (FTIR), καθώς εκεί η αντίστοιχη σειρά ήταν: A, C, D, E, B, F. Πρέπει να σημειωθεί, όμως, ότι το αποτέλεσμα της περιεκτικότητας του ATH μέσα στο υλικό είναι πιο αξιόπιστο από τη δοκιμή της θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης (TGA), παρά από την FTIR, καθώς στη δοκιμή TGA η περιεκτικότητα αυτή προκύπτει από πιο εμπεριστατωμένη διαδικασία και όχι από απλή παρατήρηση του διαγράμματος που προκύπτει από τη δοκιμή FTIR. Παρόλα αυτά η δοκιμή FTIR δίνει σημαντικά αποτελέσματα σε πολύ λίγο χρόνο και συνιστάται να γίνεται.

Άλλη μία σύγκριση που μπορεί να γίνει σε αυτό το σημείο είναι μεταξύ της δοκιμής TGA και της δοκιμής του κεκλιμένου επιπέδου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η δοκιμή του κεκλιμένου επιπέδου είναι πολύ σημαντικό να εκτελείται ώστε να διαπιστώνεται αν το υλικό περιέχει την κατάλληλη ποσότητα σε πληρωτικό υλικό ATH, ικανή ώστε να αποτρέψει τη δημιουργία αγωγίων καναλιών άνθρακα και διάβρωσης και το αποτέλεσμα της δοκιμής να είναι επιτυχές. Από τα αποτελέσματα του υποκεφαλαίου 3.4.1.4.1 είδαμε ότι τα μοναδικά δοκίμια που απέτυχαν στη δοκιμή ήταν από τους μονωτήρες: C1 (μετά το βρασμό), UE1 και C2. Τα αποτελέσματα αυτά φαίνεται να μη συμφωνούν με τα αποτελέσματα της δοκιμής TGA, καθώς στη δοκιμή αυτή φαίνεται ότι οι συγκεκριμένοι μονωτήρες έχουν αρκετά υψηλή περιεκτικότητα σε ATH και δε θα έπρεπε να αποτύχουν στη δοκιμή του κεκλιμένου επιπέδου. Αυτή η ασυμφωνία των αποτελεσμάτων πιθανόν να οφείλεται στη μη ομοιόμορφη κατανομή του πληρωτικού υλικού ATH μέσα στο υλικό. Έτσι, ίσως τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για την δοκιμή TGA να έτυχε να είχαν μεγάλη περιεκτικότητα σε ATH, ενώ τα κυάθια που χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμή του κεκλιμένου επιπέδου να είχαν μικρότερη (μη ικανή να οδηγήσει σε επιτυχές αποτέλεσμα στη δοκιμή).

Λόγω του παραπάνω, προτείνεται τα δοκίμια που θα λαμβάνονται για τη δοκιμή TGA να μην είναι μονάχα από ένα κυάθιο του μονωτήρα, αλλά από περισσότερα καθ' όλο το μήκος του μονωτήρα, ώστε να φαίνεται αν το υλικό είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο σε όλο το μήκος του. Επίσης, για ορθότερα συμπεράσματα προτείνεται, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο υποκεφάλαιο 3.4.1.4.1, και η δοκιμή του κεκλιμένου επιπέδου θα πρέπει να εφαρμόζεται σε περισσότερα (από 5) δοκίμια, τα οποία να έχουν ληφθεί από όλο το μήκος του μονωτήρα για τον ίδιο λόγο.

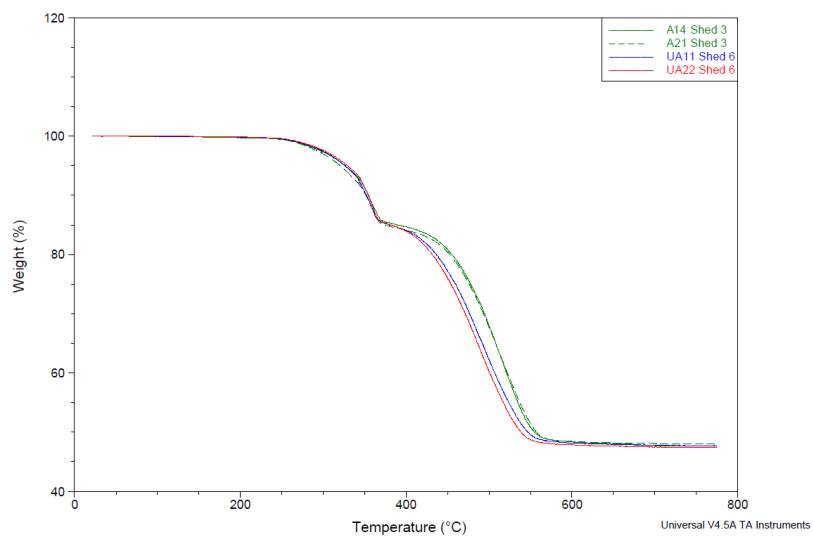
Συμπερασματικά, λόγω της διαφορετικής φύσης των τριών δοκιμών (κεκλιμένο επίπεδο, FTIR και TGA) προτείνεται να εκτελούνται και οι τρεις δοκιμές παρά τη μεγάλη διάρκεια

της TGA και ιδίως του κεκλιμένου επιπέδου, ώστε να προκύπτουν ασφαλέστερα συμπεράσματα για το υλικό των συνθετικών μονωτήρων.

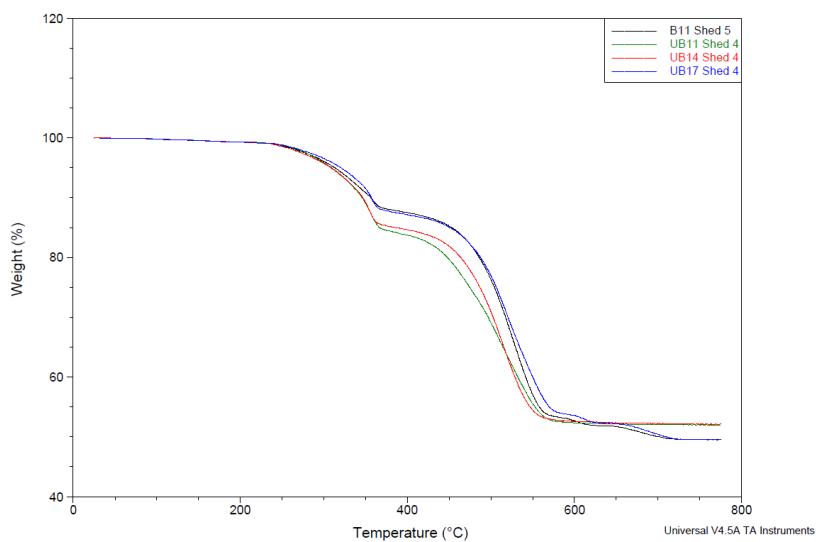


Σχήμα 3-81. Εκτίμηση της ποσότητας του πληρωτικού υλικού ATH μέσα στο μονωτικό περίβλημα των συνθετικών μονωτήρων μέσω της δοκιμής θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης (TGA).

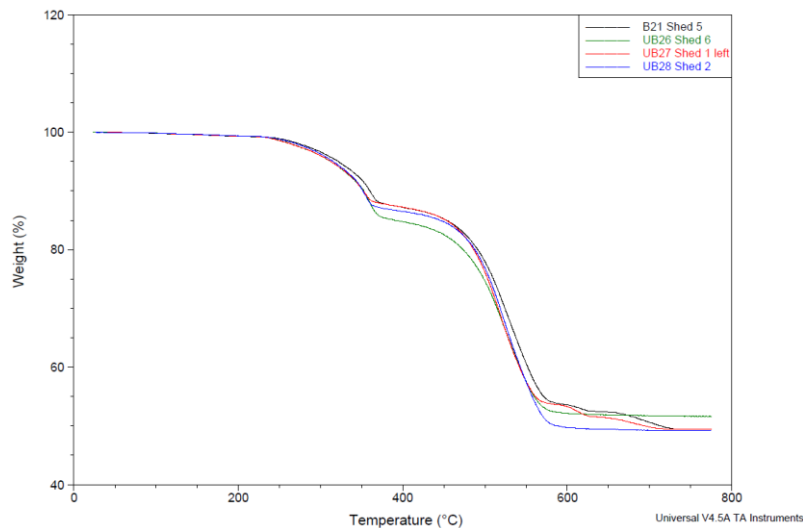
Από το σχήμα 3-81 συγκρίνοντας τις περιεκτικότητες του ATH μεταξύ καινούριων και μεταχειρισμένων μονωτήρων (διαφορετικών χρόνων λειτουργίας στο δίκτυο) παρατηρούμε ότι δε μπορούν να προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με το πως επηρεάζεται η τιμή της περιεκτικότητας του ATH καθώς αυξάνονται τα χρόνια λειτουργίας των μονωτήρων στο δίκτυο. Για τις συγκρίσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τα σχήματα 3-82 έως 3-85. Από τα σχήματα 3-82 έως 3-85 παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις μεταξύ καινούριων και μεταχειρισμένων μονωτήρων. Αυτό ίσως οφείλεται στο ότι η μεγαλύτερη διαφορά σε χρόνια λειτουργίας στο δίκτυο μεταξύ των μονωτήρων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα 10 χρόνια, τα οποία δεν είναι ιδιαίτερα πολλά. Επίσης, άλλος ένας λόγος που ίσως δεν υπάρχουν διαφορές στα διαγράμματα καινούριων και μεταχειρισμένων μονωτήρων είναι ότι τα δοκίμια για τη διεξαγωγή της δοκιμής TGA λήφθηκαν από το εσωτερικό του υλικού, το οποίο δεν καταπονείται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. υπεριώδης ακτινοβολία του ήλιου, όξινη βροχή, ρύπανση κλπ.).



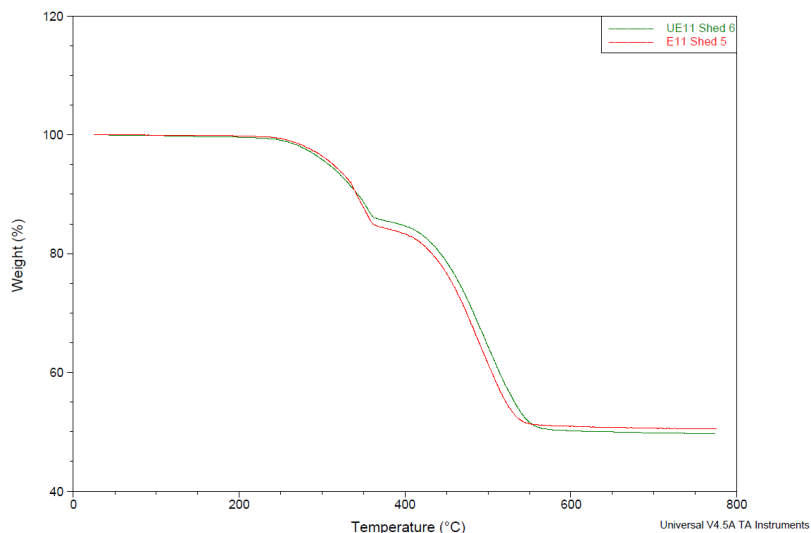
Σχήμα 3-82. Σύγκριση διαγραμμάτων TGA για καινούριους και μεταχειρισμένους μονωτήρες του κατασκευαστή A (A1: 0 χρόνια, A2: 0 χρόνια, UA11: 2 χρόνια, UA22: 2 χρόνια).



Σχήμα 3-83. Σύγκριση διαγραμμάτων TGA για καινούριους και μεταχειρισμένους μονωτήρες B1 (B1: 0 χρόνια, UB11: 10 χρόνια, UB14: 10 χρόνια, UB17: 4 χρόνια).



Σχήμα 3-84. Σύγκριση διαγραμμάτων TGA για καινούριους και μεταχειρισμένους μονωτήρες B2 (B2: 0 χρόνια, UB26: 10 χρόνια, UB27: 5 χρόνια, UB28: 10 χρόνια).



Σχήμα 3-85. Σύγκριση διαγραμμάτων TGA για καινούριους και μεταχειρισμένους μονωτήρες E1 (E1: 0 χρόνια, UE11: 3 χρόνια).

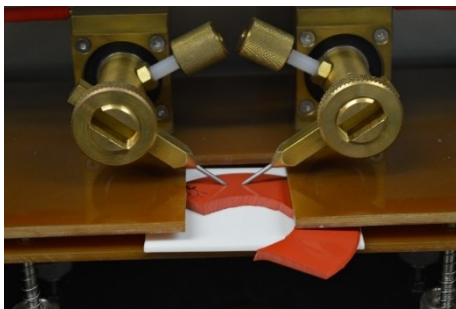
3.4.1.9 Αντίσταση σε εκκενώσεις υπό υψηλή τάση και χαμηλό ρεύμα στους συνθετικούς μονωτήρες του κατασκευαστή A

Η δοκιμή αυτή εκτελέστηκε, σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61621 [131], μόνο σε δοκίμια που λήφθηκαν από μονωτήρες A1 λόγω προβλήματος που παρουσίασε η συσκευή με την οποία γινόταν η δοκιμή. Τα δοκίμια για αυτή τη δοκιμή ήταν 3 μισά κυάθια από μονωτήρα A1. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε 10 φορές στα δοκίμια αυτά για λόγους επαναληψιμότητας και για πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για αυτή τη δοκιμή ήταν η Arc Resistance Tester – AENEA (σχήμα 3-86). Η θερμοκρασία του εργαστηρίου κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης της δοκιμής ήταν στους 21 °C.

Κατά την τοποθέτηση των δοκιμίων στη συσκευή δινόταν ιδιαίτερη προσοχή, ώστε η απόσταση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων να είναι στα 6,35 mm, όπως φαίνεται στο σχήμα 3-87. Επίσης, πριν τη δοκιμή ελεγχόταν η τάση ανοιχτού κυκλώματος μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, η οποία έπρεπε να είναι στα 12,5 kV (σχήμα 3-88 α). Στο σχήμα 3-88 β φαίνεται ένα δοκίμιο κατά την εκτέλεση της δοκιμής. Η δοκιμή αυτή διακόπτεται από τον χειριστή, αν υπάρξει καύση του υλικού, ή δημιουργία αγωγίμου μονοπατιού. Ειδικά, αν δε διακοπεί από το χειριστή λόγω αστοχίας του υλικού, η δοκιμή σταματά αυτόματα στα 420 s (7 λεπτά). Αποτέλεσμα της δοκιμής είναι ο χρόνος σε δευτερόλεπτα, είτε μέχρι την αστοχία του υλικού, είτε μέχρι τον αυτόματο τερματισμό της δοκιμής.



Σχήμα 3-86. Συσκευή Arc Resistance Tester – AENEA για εκτέλεση της δοκιμής αντίστασης σε εκκενώσεις υπό υψηλή τάση και χαμηλό ρεύμα.



α

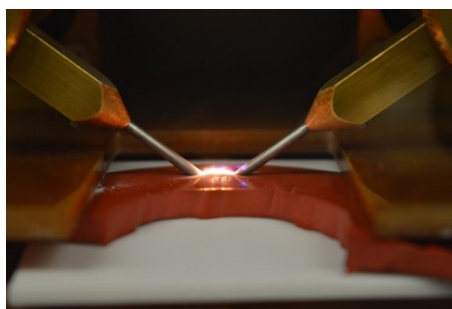


β

Σχήμα 3-87. α) Τοποθέτηση του δοκιμίου στη συσκευή και β) ρύθμιση της απόστασης των ηλεκτροδίων στα 6,35 mm.



α



β

Σχήμα 3-88. α) Ρύθμιση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος στα 12,5 kV, β) εκτέλεση της δοκιμής.

Στο σχήμα 3-89 φαίνονται τα δοκίμια μετά τη δοκιμή.



Σχήμα 3-89. Δοκίμια μετά τη δοκιμή αντίστασης σε εκκενώσεις υπό υψηλή τάση και χαμηλό ρεύμα.

Τα αποτελέσματα για το μονωτήρα A1 φαίνονται στον πίνακα 3-25. Όλα τα δοκίμια ξεπέρασαν τον ελάχιστο χρόνο αντοχής των μονωτικών υλικών εξωτερικής χρήσης, ο οποίος αναφέρεται στη βιβλιογραφία ότι θα πρέπει να είναι 180 sec [4, 133] ή αλλού 200 sec [56].

Πίνακας 3-25. Αποτελέσματα δοκιμής αντίστασης σε εκκενώσεις υπό υψηλή τάση και χαμηλό ρεύμα για μονωτήρα A1.

Μονωτήρας	Μετρήσεις [s]			
	A1	420	420	420
343		345	392	
420		420	420	

Δυστυχώς, η δοκιμή αυτή όπως προαναφέρθηκε πραγματοποιήθηκε μόνο σε δοκίμια των μονωτήρων A1, καθώς παρουσιάστηκε τεχνικό πρόβλημα στη συσκευή Arc Resistance Tester – AENEΑ. Όμως αυτό δεν αποτέλεσε ιδιαίτερο πρόβλημα, καθώς η δοκιμή του κεκλιμένου επιπέδου, η οποία πραγματοποιήθηκε σε όλους τους μονωτήρες (υποκεφάλαιο 3.4.1.4.1), εξετάζει το ίδιο φαινόμενο (αντοχή του μονωτικού περιβλήματος σε διάβρωση

και δημιουργία αγωγίμων καναλιών άνθρακα – tracking and erosion test), με πιο σύνθετη διαδικασία και μεγαλύτερη διάρκεια δοκιμής. Επομένως, θεωρούμε ότι τα αποτελέσματα της δοκιμής του κεκλιμένου επιπέδου υπερκαλύπτουν τα αποτελέσματα που θα λαμβάνονταν από τη δοκιμή αντίστασης σε εκκενώσεις υπό υψηλή τάση και χαμηλό ρεύμα.

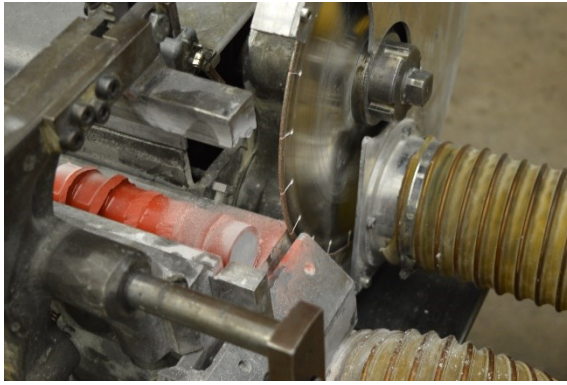
3.4.1.10 Αντίσταση του μονωτικού περιβλήματος σε οξεία

Στους καινούριους - αχρησιμοποίητους συνθετικούς μονωτήρες όλων των κατασκευαστών εκτελέστηκε, επίσης, η δοκιμή αντίστασης του μονωτικού περιβλήματος τους σε οξύ (συγκεκριμένα νιτρικό οξύ HNO_3), το οποίο προσομοιώνει κυρίως το νιτρικό οξύ που καταπονεί τους συνθετικούς μονωτήρες κατά τη λειτουργία τους στο ηλεκτρικό δίκτυο λόγω της συνδυασμένης δράσης των: α) ηλεκτρικών εκκενώσεων Corona, β) της επικαθήμενης στο μονωτήρα υγρασίας και γ) του οξυγόνου, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο υποκεφάλαιο 2.2.1.10.

Για τη δοκιμή αυτή δεν υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο πρότυπο όπου να προδιαγράφεται η διαδικασία εκτέλεσης της. Στη συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στη συνέχεια.

Αρχικά, γίνεται η προετοιμασία του δοκιμίου. Το δοκίμιο είναι ένα κομμένο κομμάτι από τη ράβδο του συνθετικού μονωτήρα, από το οποίο έχουν αφαιρεθεί τα κυάθια του. Συγκεκριμένα, με τη χρήση ενός δίσκου κοπής με διαμάντια (σχήμα 3-90 α) κόβεται ένα κομμάτι 10 cm από τη ράβδο του μονωτήρα. Στη συνέχεια, με ένα μαχαίρι αφαιρούνται τα κυάθια από το κομμάτι (σχήμα 3-90 β).

Έπειτα, γίνεται η προετοιμασία διαλύματος νιτρικού οξέος με συγκέντρωση 1 mol / λίτρο απιονισμένου νερού. Για τον υπολογισμό της ποσότητας του διαλύματος νιτρικού οξέος σε γραμμάρια είναι απαραίτητα τα στοιχεία του πίνακα 3-26. Επίσης, αναφέρεται εδώ ότι το διαθέσιμο κατά τη δοκιμή διάλυμα νιτρικού οξέος ήταν συγκέντρωσης 68 % κατ' όγκο.



α



β

Σχήμα 3-90. α) Πριόνι με διαμάντια στο δίσκο, β) κομμάτι 10 cm από τη ράβδο μονωτήρα A1 με κομμένα κιάβια.

Πίνακας 3-26. Κάποιες χρήσιμες παράμετροι για τον υπολογισμό της μάζας, σε γραμμάρια, του νιτρικού οξέος και του απιονισμένου νερού που χρειάζονται για παρασκευή διαλύματος 1 λίτρου με συγκέντρωση νιτρικού οξέος 1 mol / λίτρο.

Σύμβολο	Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
$C_{\text{διαλ}}$	Συγκέντρωση νιτρικού οξέος στο διάλυμα	1	mol / l
$V_{\text{διαλ}}$	Απαιτούμενος όγκος διαλύματος	1	l
$T_{\text{δοκιμής}}$	Θερμοκρασία διαλύματος κατά την εκτέλεση της δοκιμής	30	°C
M_{HNO_3}	Μοριακή μάζα του νιτρικού οξέος	63,013	g / mol
C_{HNO_3}	Συγκέντρωση διαθέσιμου διαλύματος νιτρικού οξέος	68	wt %
ρ_{HNO_3}	Πυκνότητα νιτρικού οξέος στους 30 °C	1,39	g / cm ³
$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$	Πυκνότητα νερού στους 30 °C	0,99526	g / cm ³

Στη συνέχεια με τα δεδομένα του πίνακα 3-26 υπολογίζεται η μάζα του νιτρικού οξέος που χρειάζεται:

$$m_{\text{HNO}_3} = C_{\text{διαλ}} * M_{\text{HNO}_3} * V_{\text{διαλ}} * C_{\text{HNO}_3}^{-1} = 1 \frac{\text{mol}}{\text{l}} * 63,013 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 1 \text{ l} * 0,68^{-1} = 92,66 \text{ g}$$

Ακολούθως, υπολογίζεται ο όγκος του νιτρικού οξέος στους 30 °C, γνωρίζοντας την πυκνότητα του σε αυτή τη θερμοκρασία και τη μάζα του:

$$V_{\text{HNO}_3} = \frac{m_{\text{HNO}_3}}{\rho_{\text{HNO}_3}} = \frac{92,66 \text{ g}}{1,39 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 66,66 \text{ cm}^3 = 66,66 \text{ ml}$$

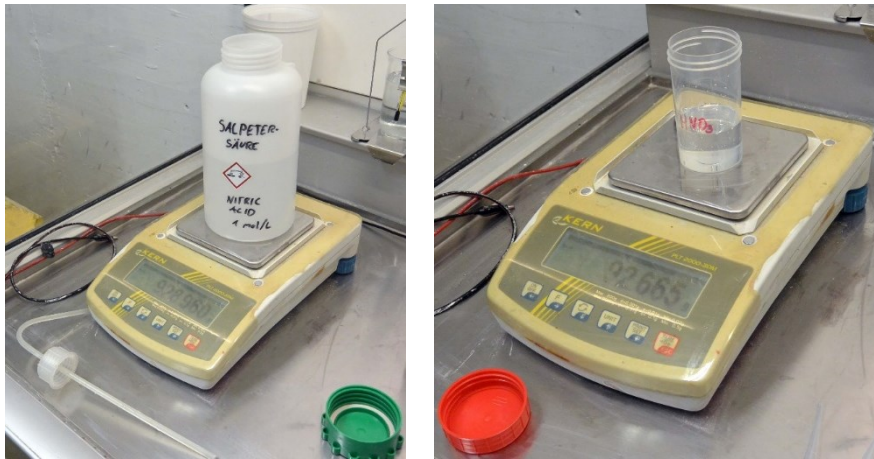
Έπειτα γνωρίζοντας τον όγκο του νιτρικού οξέος στους 30 °C και τον απαιτούμενο όγκο του διαλύματος που θέλουμε να παρασκευάσουμε, υπολογίζουμε τον όγκο του απιονισμένου νερού που χρειαζόμαστε:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{διαλ}} * 1000 - V_{\text{HNO}_3} = 1000 \text{ ml} - 66,66 \text{ ml} = 933,34 \text{ ml} = 933,34 \text{ cm}^3$$

Τέλος, υπολογίζεται η μάζα του απιονισμένου νερού σε γραμμάρια, δεδομένου του όγκου του και της πυκνότητας του στους 30 °C.

$$m_{H_2O} = V_{H_2O} * \rho_{H_2O} = 933,34 \text{ cm}^3 * 0,99526 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 928,91 \text{ g}$$

Έπειτα χρησιμοποιείται μια ζυγαριά ακρίβειας $\pm 1 \text{ mg}$ για την παρασκευή του διαλύματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 3-91.



Σχήμα 3-91. Ζύγιση της μάζας του απαιτούμενου απιονισμένου νερού (αριστερά) και του απαιτούμενου διαλύματος νιτρικού οξέος (δεξιά) για την παρασκευή διαλύματος νιτρικού οξέος.

Στη συνέχεια, το κομμάτι του μονωτήρα βυθίζεται μέσα στο διάλυμα νιτρικού οξέος, το οποίο βρίσκεται μέσα σε δοχείο κατασκευασμένο από πολυαιθυλένιο. Το δοχείο αυτό τοποθετείται σε δεξαμενή γεμάτη με νερό σε σταθερή θερμοκρασία, $30 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1,0 \text{ }^\circ\text{C}$, για 100 ώρες (σχήμα 3-92).

Μετά τις 100 ώρες το δοκίμιο ξεπλένεται με απιονισμένο νερό και τοποθετείται σε φούρνο στους $80 \text{ }^\circ\text{C}$ για 12 ώρες, ώστε να στεγνώσει. Τέλος, γίνεται οπτική παρατήρηση του δοκιμίου. Το αποτέλεσμα της δοκιμής είναι επιτυχές αν δεν υπάρχουν καθόλου ρωγμές στο δοκίμιο και ανεπιτυχές αν υπάρχουν. Επίσης, στην περίπτωση ανεπιτυχούς αποτελέσματος είναι σημαντικό, κατά την οπτική παρατήρηση των δοκιμίων μετά τη δοκιμή, να διαπιστωθεί εάν οι ρωγμές που έχουν σχηματιστεί διαπερνούν εντελώς το σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) φτάνοντας μέχρι τη ράβδο του μονωτήρα. Αν αυτό ισχύει τότε το υλικό των μονωτήρων είναι ευαίσθητο σε οξέα.



Σχήμα 3-92. Βύθιση του δοκιμίου στο διάλυμα νιτρικού οξέος, σε δοχείο από πολυαιθυλένιο και τοποθέτηση του, σε δεξαμενή γεμάτη με νερό, στους 30 °C για 100 ώρες.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής στους συνθετικούς μονωτήρες φαίνονται στο σχήμα 3-93.



α



β



γ



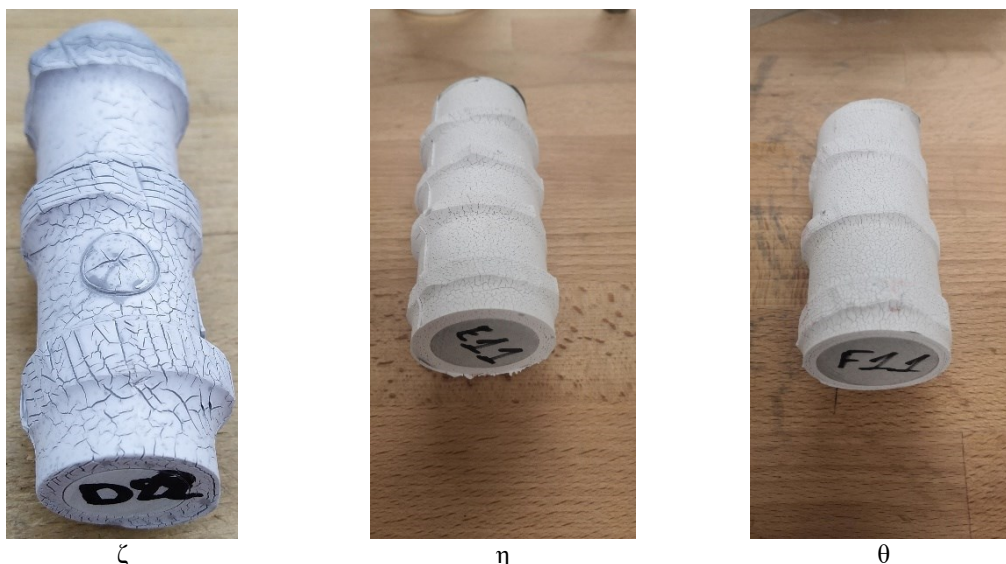
δ



ε



στ



Σχήμα 3-93. Δοκίμια μετά τη δοκιμή από μονωτήρες: α) A1, β) A2, γ) B1, δ) C1, ε) C2, στ) D1, ζ) D2, η) E1, θ) F1.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3-93, τα δοκίμια έχουν έντονα σημάδια διάβρωσης, τα οποία οφείλονται στο φαινόμενο της χημικής εξουδετέρωσης που συμβαίνει μεταξύ του οξέος και του πληρωτικού υλικού aluminium trihydrate (ATH), που όπως επαληθεύτηκε και στις δοκιμές FTIR και TGA περιέχεται στο silicone rubber των συνθετικών μονωτήρων όλων των κατασκευαστών. Ουσιαστικά, αυτή η δοκιμή οδηγεί σε «εξαφάνιση» του ATH (που είναι είδος άλατος) από το σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) των δοκιμίων. Παρατηρούμε ότι σε όλα τα δοκίμια οι ρωγμές που σχηματίστηκαν είναι αρκετά έντονες και φτάνουν μέχρι και τη ράβδο των συνθετικών μονωτήρων, γεγονός που σημαίνει ότι το μονωτικό τους περίβλημα είναι αρκετά ευαίσθητο στα οξέα.

3.4.2 Διερεύνηση της ράβδου των συνθετικών μονωτήρων

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν η δοκιμή διάχυσης νερού (water diffusion test) και η δοκιμή διείσδυσης βαφής (dye penetration test) στις ράβδους των συνθετικών μονωτήρων, όπως περιγράφονται παρακάτω, ώστε να διαφανεί η ποιότητα κατασκευής της ράβδου τους, αλλά και να διερευνηθούν οι δύο δοκιμές σε βάθος και να προταθούν προσθήκες και βελτιώσεις σε αυτές.

3.4.2.1 Δοκιμή διάχυσης νερού (Water diffusion test)

Στους καινούριους και στους μεταχειρισμένους μονωτήρες πραγματοποιήθηκε η δοκιμή διάχυσης νερού, προκειμένου να φανεί η ποιότητα της ράβδου τους. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη δοκιμή αυτή περιγράφεται στο Πρότυπο IEC 62217 [151] και στο

υποκεφάλαιο 2.2.2.1 της παρούσης διδακτορικής διατριβής. Επίσης, στο ίδιο υποκεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφική διερεύνηση της δοκιμής αυτής σε συνθετικούς μονωτήρες.

Για τη δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν 6 δοκίμια (για λόγους επαναληψιμότητας) από τους καινούριους μονωτήρες κάθε κατασκευαστή και κάθε τύπου και 6 δοκίμια από τους μεταχειρισμένους μονωτήρες από κάθε χρωματική ομάδα των πινάκων 3-5 και 3-6. Όποτε το μήκος ενός μονωτήρα δεν επαρκούσε για τη λήψη 6 δοκιμίων, χρησιμοποιούνταν και άλλοι μονωτήρες ίδιων χαρακτηριστικών, ίδιου τύπου, ίδιου κατασκευαστή, ίδιας παλαιότητας και ίδιας περιοχής αποξήλωσης (για τους μεταχειρισμένους μονωτήρες). Ωστόσο, εάν και πάλι το μήκος των διαθέσιμων μονωτήρων δεν επαρκούσε για τη λήψη 6 δοκιμίων, λαμβάνονταν λιγότερα δοκίμια. Τα δοκίμια για τη δοκιμή αυτή ήταν κομμάτια από τη ράβδο των συνθετικών μονωτήρων μήκους $30 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ (κόβονταν με δίσκο κοπής με διαμάντια σχήμα 3-94 α), αφού τους είχαν αφαιρεθεί με μαχαίρι τα κυάθια τους (σχήμα 3-94 β).



α



β

Σχήμα 3-94. α) Δίσκος κοπής με διαμάντια, και β) 6 δοκίμια για τη δοκιμή διάχυσης νερού από τους καινούριους μονωτήρες C11, C13 και C14.

Στη συνέχεια τα δοκίμια λειαίνονταν με γυαλόχαρτο νούμερο 180, ώστε να γίνουν επίπεδα και υποβάλλονταν σε βρασμό $100 \pm 0,5$ ωρών σε κατάλληλο δοχείο (από ανοξείδωτο ατσάλι) μέσα σε διάλυμα απιονισμένου νερού με 0,1% κατά βάρος χλωριούχο νάτριο (NaCl), όπως περιγράφεται στο Πρότυπο IEC 62217 [151].

Αφού τα δοκίμια συμπλήρωναν τις 100 ώρες βρασμού, τοποθετούνταν σε απιονισμένο νερό, ώστε να κρυσώσουν. Αφαιρούνταν από το απιονισμένο νερό, σκουπίζονταν με καθαρό πανί για να στεγνώσουν και στη συνέχεια τοποθετούνταν ανάμεσα σε δύο επίπεδες

μεταλλικές πλάκες, όπου τους ασκούταν η απαιτούμενη από το Πρότυπο IEC 62217 [151] AC τάση των 12 kV για 1 λεπτό από μετασχηματιστή 100 kV, που περιλαμβάνονταν στη συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή (σχήμα 3-95) (η δοκιμή εκτελούνταν μέσα στις επόμενες 3 ώρες μετά τον βρασμό των δοκιμίων).

Επίσης, σαν προσθήκη στην παραπάνω δοκιμή του Προτύπου IEC 62217 [151], πραγματοποιούνταν τα παρακάτω: μετά την πάροδο των 60s στα 12 kV, η τάση αυξανόταν στα 18 kV (AC rms) και διατηρούταν σταθερή για 30s επιπλέον. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής μετρούταν με ψηφιακό πολύμετρο το ρεύμα διαρροής στο δοκίμιο (σχήμα 3-96), το οποίο δεν έπρεπε να ξεπεράσει την τιμή του 1 mA. Επίσης, κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της δοκιμής δεν επιτρέπεται να συμβεί υπερπήδηση του μονωτήρα (flashover), αλλά ούτε και τόξο, είτε μέσα από τη ράβδο του μονωτήρα, είτε από τη διεπαφή μεταξύ ράβδου και μονωτικού περιβλήματος (flashunder). Αν συνέβαινε υπερπήδηση ή τόξο, η δοκιμή διακοπτόταν αυτόματα από τη συσκευή.



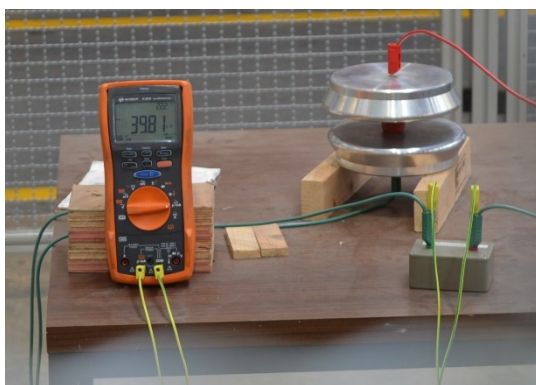
α



β

Σχήμα 3-95. α) Επίπεδες μεταλλικές πλάκες μεταξύ των οποίων εφαρμόζεται η απαιτούμενη AC τάση, και β) συσκευή που χρησιμοποιείται για τη δοκιμή και περιλαμβάνει μετασχηματιστή 100 kV.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής παρουσιάζονται στον πίνακα 3-27. Τοποθετήθηκαν παύλες σε κάποια κελιά του πίνακα, επειδή στους συγκεκριμένους μονωτήρες δεν επαρκούσε το μήκος, ώστε να παραχθούν τα 6 δοκίμια. Οπότε, σε αυτούς τους μονωτήρες αρκούμαστε σε λιγότερα δοκίμια. Επίσης, με πορτοκαλί χρώμα παρουσιάζονται τα ανεπιτυχή αποτελέσματα της δοκιμής στην προσθήκη που έγινε από εμάς στη διαδικασία του Προτύπου IEC 62217 [151], δηλαδή την αύξηση της τάσης στα 18 kV για 30s. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι μονωτήρες που απέτυχαν στη δοκιμή, όπως αυτή περιγράφεται στο Πρότυπο IEC 62217 [151].



Σχήμα 3-96. Ψηφιακό πολύμετρο για τη μέτρηση του ρεύματος διαρροής.

Πίνακας 3-27. Αποτελέσματα δοκιμής διάχυσης νερού στα δοκίμια των μονωτήρων.

Μονωτήρες	Αριθμός μονωτήρα	Αριθμός δοκιμίου	Ρεύμα διαρροής στα 12 kV [μΑ]	Ρεύμα διαρροής στα 18 kV [μΑ]	Μονωτήρες	Αριθμός μονωτήρα	Αριθμός δοκιμίου	Ρεύμα διαρροής στα 12 kV [μΑ]	Ρεύμα διαρροής στα 18 kV [μΑ]
A1	6	1	117	165	UB2 (2η Ομάδα)	7	1	40	60
	8	2	90	154		7	2	40	60
	9	3	110	192		7	3	41	61
	9	4	93	136		7	4	40	60
	9	5	76	122		7	5	41	62
	9	6	79	117		7	6	40	60
UA1	2	1	55	90	UB2 (3η Ομάδα)	8	1	82	303
	2	2	57	97		8	2	62	120
	2	3	61	102		8	3	840	Υπερπήδηση στα 14,8 kV
	2	4	55	86		8	4	121	Υπερπήδηση στα 14,8 kV
	3	5	75	Υπερπήδηση στα 13,6 kV		8	5	68	Υπερπήδηση στα 17,7 kV
	-	6	-	-		8	6	62	Υπερπήδηση στα 17,5 kV
A2	2	1	40	60	C1	1	1	44	65
	2	2	39	59		1	2	43	64
	2	3	39	60		1	3	43	64
	2	4	41	61		3	4	43	65
	2	5	40	60		4	5	43	63
	2	6	40	60		4	6	43	66
UA2	2	1	Υπερπήδηση στα 12 kV		C2	2	1	40	61
	2	2	Υπερπήδηση στα 12 kV			2	2	40	58
	2	3	38	58		2	3	39	59

	2	4	40	60		4	4	148	307
	2	5	35	59		4	5	141	308
	2	6	35	60		4	6	121	258
B1	1	1	52	78	D1	1	1	50	75
	1	2	50	75		1	2	51	76
	1	3	54	80		1	3	50	75
	1	4	52	76		1	4	51	77
	-	5	-	-		1	5	51	76
	-	6	-	-		4	6	49	73
UB1 (1η Ομάδα)	1	1	Υπερπήδηση στα 10,6 kV		D2	2	1	55	71
	1	2	Υπερπήδηση στα 8,7 kV			2	2	57	71
	1	3	Υπερπήδηση στα 8,3 kV			2	3	43	64
	1	4	167	Υπερπήδηση στα 15 kV		2	4	43	65
	2	5	173	Υπερπήδηση στα 16,9 kV		2	5	43	63
	2	6	170	Υπερπήδηση στα 15,9 kV		2	6	42	63
UB1 (2η Ομάδα)	4	1	117	Υπερπήδηση στα 17,7 kV	E1	2	1	110	110
	4	2	87	143		2	2	114	Υπερπήδηση στα 17,5 kV
	5	3	1900	Υπερπήδηση στα 17 kV		2	3	46	71
	-	4	-	-		2	4	49	76
	-	5	-	-		-	5	-	-
	-	6	-	-		-	6	-	-
UB1 (3η Ομάδα)	7	1	62	Εσωτερικό τόξο στα 13 kV	UE1	1	1	86	147
	7	2	Εσωτερικό τόξο στα 7,9 kV			1	2	91	150
	8	3	54	82		1	3	90	151
	8	4	57	88		9	4	161	330
	-	5	-	-		9	5	74	122
	-	6	-	-		9	6	146	286
B2	1	1	42	64	F1	1	1	120	110
	1	2	41	60		2	2	48	79
	1	3	41	62		-	3	-	-

	1	4	41	63		-	4	-	-
	1	5	41	62		-	5	-	-
	-	6	-	-		-	6	-	-
UB2 (1η Ομάδα)	2	1	120	190					
	2	2	117	Υπερπήδηση στα 17,1 kV					
	2	3	116	190					
	2	4	120	185					
	2	5	222	Υπερπήδηση στα 17,3 kV					
	-	6	-	-					

Ένα συμπέρασμα που προκύπτει από τον πίνακα 3-27 είναι ότι όλοι οι καινούριοι μονωτήρες πέρασαν επιτυχώς τη δοκιμή διάχυσης νερού του Προτύπου IEC 62217 [151], καθώς και τη δική μας προσθήκη στη δοκιμή αυτή (18 kV AC για 30s), εκτός από ένα δοκίμιο από μονωτήρα E1, το οποίο οριακά δεν πέρασε στην επιπρόσθετη δική μας δοκιμή με τα 18 kV, λόγω υπερπήδησης στα 17,5 kV. Βάσει των παραπάνω μπορούμε να πούμε ότι το υλικό της ράβδου όλων των καινούριων μονωτήρων είναι σύμφωνο με τις προδιαγραφές του Προτύπου IEC 62217 [151] ως προς τη δοκιμή διάχυσης νερού, όπως επίσης και με την επιπλέον δική μας προσθήκη της δοκιμής στα 18 kV, πράγμα που υποδηλώνει την καλή ποιότητα του υλικού τους. Επιπλέον, αφού οι μονωτήρες από όλους τους κατασκευαστές περνούν επιτυχώς τη δοκιμή στα 18 kV θα μπορούσε αυτή η προσθήκη στη δοκιμή διάχυσης νερού να προστεθεί στο Πρότυπο IEC 62217 [151] με σκοπό τη διασφάλιση της πολύ καλής ποιότητας της ράβδου των συνθετικών μονωτήρων. Επιπροσθέτως, τα ρεύματα διαρροής των δοκιμίων των καινούριων μονωτήρων είναι αρκετά χαμηλά σε σχέση με το όριο του 1 mA (1000 μA) και κυμαίνονται από 3,9% έως 30,8% σε σχέση με το όριο.

Από την άλλη μεριά, από τους μεταχειρισμένους μονωτήρες μόνο ο UB27 με 5 χρόνια λειτουργίας στο δίκτυο πέρασε και τις δύο δοκιμές (12 kV και 18 kV). Οι UA1 με 2 χρόνια στο δίκτυο, UB22 με 10 χρόνια στο δίκτυο και UB28 με 10 χρόνια στο δίκτυο πέρασαν επιτυχώς τη δοκιμή των 12 kV, αλλά απέτυχαν στη δοκιμή των 18 kV. Τέλος, οι μονωτήρες UA2 με 2 χρόνια στο δίκτυο, UB11-UB12 με 10 χρόνια στο δίκτυο, και UB17-UB18 με 4 χρόνια στο δίκτυο απέτυχαν στη δοκιμή των 12 kV είτε λόγω υπερπήδησης, είτε λόγω εσωτερικού τόξου που συνέβη σε τάση μικρότερη ή ίση των 12 kV. Μόνο το δοκίμιο που λήφθηκε από το μονωτήρα UB15 απέτυχε λόγω του ρεύματος διαρροής το οποίο ήταν

σχεδόν διπλάσιο του επιτρεπόμενου ορίου (1,9 mA). Συμπερασματικά ως προς τα παραπάνω μπορούμε να πούμε ότι τα αποτελέσματα της δοκιμής διάχυσης νερού δεν ήταν ικανοποιητικά στους μεταχειρισμένους συνθετικούς μονωτήρες. Εφόσον, μόνο ένας από τους μονωτήρες πέρασε επιτυχώς την δοκιμή στα 18 kV προκύπτει το συμπέρασμα ότι αυτή η προσθήκη στο Πρότυπο IEC 62217 [151] θα πρέπει να εφαρμόζεται μόνο σε καινούριους συνθετικούς μονωτήρες, καθώς από ό,τι φάνηκε από τα αποτελέσματα, οι μεταχειρισμένοι μονωτήρες στην πλειοψηφία τους δεν μπορούν να αντέξουν την τάση των 18 kV. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι το αποτέλεσμα της δοκιμής αυτής δεν συνδέεται με τα χρόνια λειτουργίας των μονωτήρων στο δίκτυο, καθώς απέτυχαν μονωτήρες με 2 χρόνια στο δίκτυο, ενώ πέρασαν επιτυχώς μονωτήρες που ήταν τοποθετημένοι 5 και 10 χρόνια στο δίκτυο.

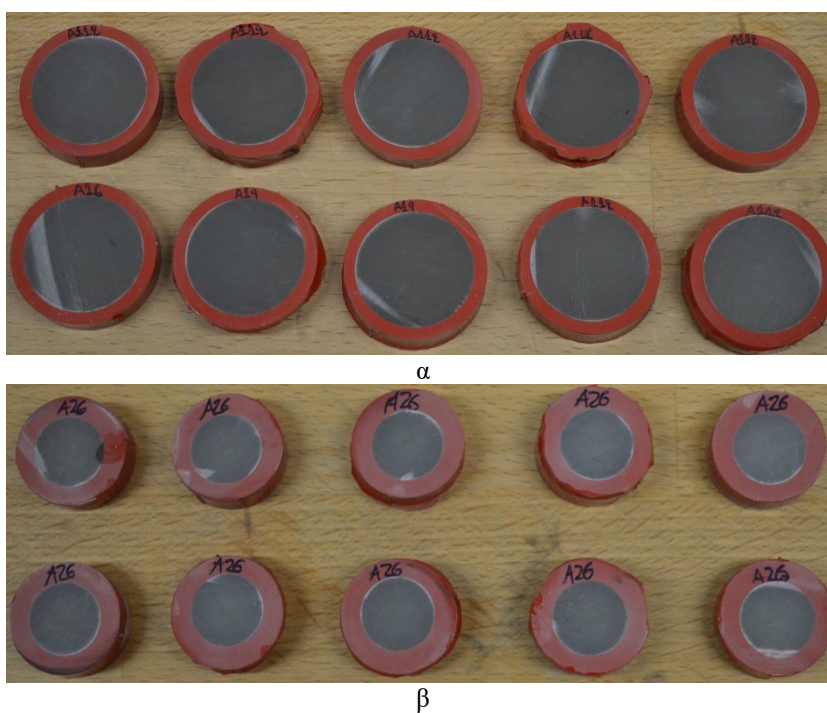
Σε επόμενο υποκεφάλαιο και συγκεκριμένα στο 3.4.3 διερευνάται η συσχέτιση του ρεύματος διαρροής που καταγράφηκε κατά τη δοκιμή διάχυσης νερού με το πόσο καλή είναι η σύνδεση της ράβδου με το μονωτικό περίβλημα των συνθετικών μονωτήρων και προτείνεται και αυτή η διαδικασία ως προσθήκη στο Πρότυπο IEC 62217 [151].

3.4.2.2 Δοκιμή διείσδυσης βαφής (Dye penetration test)

Η δεύτερη δοκιμή που εκτελέστηκε για να φανεί η ποιότητα της ράβδου των καινούριων, αλλά και των μεταχειρισμένων συνθετικών μονωτήρων ήταν η δοκιμή διείσδυσης βαφής (dye penetration test). Η δοκιμή αυτή εκτελέστηκε σύμφωνα με το πρότυπο IEC 62217 [151] και η διαδικασία έχει περιγραφεί διεξοδικά στο υποκεφάλαιο 2.2.2.2 της παρούσης διδακτορικής διατριβής.

Τα δοκίμια για αυτήν τη δοκιμή απαιτείται να είναι 10 κομμάτια από τη ράβδο του μονωτήρα με κομμένα τα κιάλια τους και με μήκος $10 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$. Μετά το κόψιμο των κομματιών με το δίσκο κοπής του σχήματος 3-94 (α), τα δοκίμια λειάνθηκαν πρώτα με γυαλόχαρτο νούμερου 60 και μετά με 120. Επίσης, η πάνω μεριά των δοκιμίων η οποία παρέμενε εκτός της βαφής και ήταν αυτή την οποία παρατηρήσαμε λειάνθηκε και με γυαλόχαρτο νούμερου 220, ώστε να φαίνονται πιο καθαρά τα αποτελέσματα της δοκιμής. Στη συνέχεια, τα δοκίμια καθαρίστηκαν με ισοπροπυλική αλκοόλη και αφέθηκαν να στεγνώσουν. Στο σχήμα 3-97 (α) φαίνονται τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν από τους μονωτήρες A1 (καινούριοι μονωτήρες στήριξης του κατασκευαστή A) και στο (β) από τους μονωτήρες A2 (αντίστοιχοι μονωτήρες ανάρτησης).

Κατά την εκτέλεση της δοκιμής αυτής σε δοκίμια από συνθετικούς μονωτήρες έχει παρατηρηθεί ότι η βαφή έχει την τάση (λόγω του τριχοειδούς φαινομένου – capillary action: το τριχοειδές φαινόμενο εμφανίζεται όταν η πρόσφυση ενός υγρού στα τοιχώματα ενός στερεού είναι ισχυρότερη από τις δυνάμεις συνοχής μεταξύ των μορίων του υγρού) να ανεβαίνει από την επιφάνεια του μονωτικού περιβλήματος (δηλαδή από τα πλάγια) και να καταβρέχει το επάνω μέρος του δοκιμίου, κάνοντας το αποτέλεσμα της δοκιμής αναξιόπιστο. Έτσι, υιοθετήθηκε ως προσθήκη στη διαδικασία του προτύπου IEC 62217 [151], η τακτική που περιγράφεται στη συνέχεια. Η εξωτερική επιφάνεια του μονωτικού περιβλήματος του κάθε δοκιμίου επαλείφθηκε με γυαλιστικό νυχιών, ώστε να μην εμφανίζεται το τριχοειδές φαινόμενο και κατά συνέπεια η βαφή να μπορεί να βγει στην επιφάνεια της ράβδου μόνο μέσα από αυτήν, όπως φαίνεται στο σχήμα 3-98.

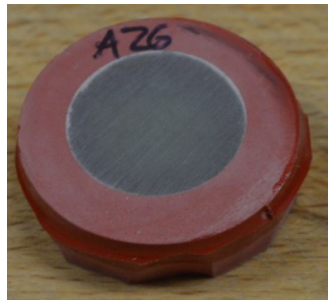


Σχήμα 3-97. Δοκίμια από τους συνθετικούς μονωτήρες α) A1 (στήριξης) και β) A2 (ανάρτησης) του κατασκευαστή Α, πριν την εκτέλεση της δοκιμής διεπίδωσης βαφής.

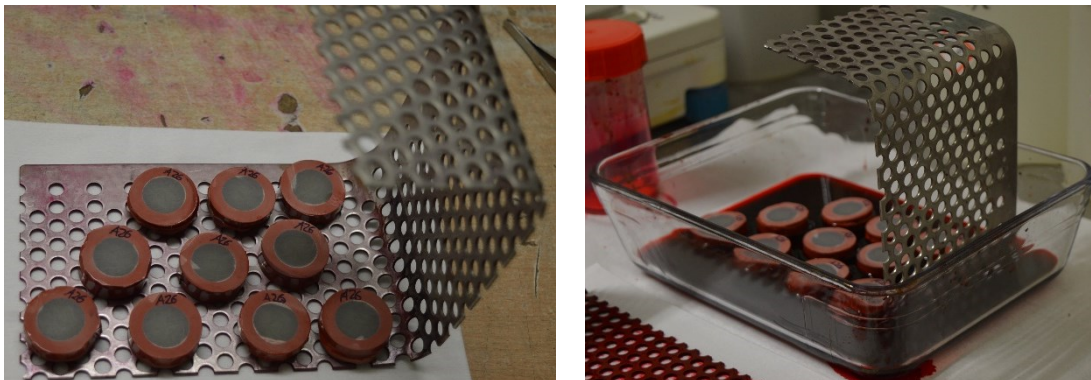
Στη συνέχεια παρασκευάστηκε το υγρό διάλυμα που περιέχει 1% κατά βάρος Astrazon BR 200 (Astrazon 4G brilliant red 200%) και το υπόλοιπο μεθανόλη (methanol). Επιπλέον, τα δοκίμια τοποθετήθηκαν επάνω σε ένα μεταλλικό πλέγμα, ώστε να βυθιστούν κατά το ήμισυ στο δοχείο με τη βαφή (σχήμα 3-99).

Μετά το πέρας των 15 λεπτών τα δοκίμια αφαιρούνταν από τη βαφή, τοποθετούνταν επάνω σε πορώδη πετσέτα και παρατηρούνταν οπτικά για τυχόντα σημάδια βαφής στην επιφάνεια της ράβδου τους. Στο **Παράρτημα Γ** παρουσιάζονται τα δοκίμια όλων των μονωτήρων

που εξετάστηκαν σε αυτή τη δοκιμή μετά το πέρας των 15 λεπτών. Στις φωτογραφίες των δοκιμίων που υπάρχουν στο συγκεκριμένο Παράρτημα Γ, με κύκλους μπλε χρώματος έχουν επισημανθεί τα σημάδια από τη διείσδυση της βαφής στις ράβδους (ανεπιτυχές αποτέλεσμα), ενώ με κίτρινους κύκλους σημάνθηκαν τα σημεία όπου η βαφή ανέβηκε από τα τοιχώματα του μονωτικού περιβλήματος στο πάνω μέρος των δοκιμίων (τριχοειδές φαινόμενο) παρά την τεχνική με την επάλειψη με γυαλιστικό νυχιών που υιοθετήθηκε. Σημειώνεται εδώ πως, όποιος κίτρινος κύκλος υπάρχει στα σχήματα του Παραρτήματος Γ, δεν έχει ληφθεί υπόψιν στην απόφαση για επιτυχές ή ανεπιτυχές αποτέλεσμα της δοκιμής.



Σχήμα 3-98. Δοκίμιο που στις άκρες του φαίνεται το γυαλιστικό νυχιών με το οποίο επαλείφθηκε για την αντιμετώπιση του τριχοειδούς φαινομένου.



Σχήμα 3-99. Τοποθέτηση των δοκιμίων στο μεταλλικό πλέγμα (αριστερά) και βύθιση τους κατά το ήμισυ στο διάλυμα βαφής (δεξιά).

Στον πίνακα 3-28 φαίνονται συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα της δοκιμής σε όλους τους μονωτήρες, καθώς και τα χρόνια λειτουργίας τους στο ηλεκτρικό δίκτυο. Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων αξιολογήθηκαν τα σχήματα του Παραρτήματος Γ (όποιο δοκίμιο είχε έστω και έναν μπλε κύκλο, θεωρούταν ότι δεν πέρασε επιτυχώς τη δοκιμή διείσδυσης βαφής).

Πίνακας 3-28. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα από τα σχήματα του Παραρτήματος Γ για τη δοκιμή διείσδυσης βαφής.

Μονωτήρας	Χρόνια στο δίκτυο	Αποτέλεσμα (Δοκίμια με επιτυχές αποτέλεσμα / σύνολο δοκιμίων)	Αποτέλεσμα (% των δοκιμίων που πέρασαν επιτυχώς)
A2	0	8 / 10	80%
B2	0	8 / 10	80%
C1	0	8 / 10	80%
C2	0	8 / 10	80%
D2	0	8 / 10	80%
E1	0	7 / 10	70%
D1	0	6 / 10	60%
F1	0	3 / 8	38%
B1	0	1 / 8	13%
A1	0	1 / 10	10%
UA1	2	2 / 6	33%
UA2	2	8 / 10	80%
UE1	3	9 / 10	90%
UB1 (3η Ομάδα)	4	3 / 5	60%
UB2 (2η Ομάδα)	5	1 / 6	17%
UB1 (1η Ομάδα)	10	5 / 7	71%
UB1 (2η Ομάδα)	10	4 / 5	80%
UB2 (1η Ομάδα)	10	1 / 6	17%
UB2 (3η Ομάδα)	10	2 / 7	29%

Από τα αποτελέσματα του πίνακα 3-28 παρατηρούμε ότι κανένας μονωτήρας δεν πέρασε επιτυχώς τη δοκιμή αυτή, καθώς το Πρότυπο IEC 62217 [151] δεν επιτρέπει καμία διείσδυση βαφής στην επιφάνεια των δοκιμίων (10 κομματιών του κάθε μονωτήρα) σε διάστημα 15 λεπτών. Λαμβάνοντας υπόψιν το γεγονός αυτό προτείνεται η δοκιμή αυτή να πραγματοποιηθεί σε συνθετικούς μονωτήρες από περισσότερους κατασκευαστές και αν ΟΛΟΙ αποτύχουν στη δοκιμή (δηλαδή εάν έστω και 1 από τα 10 δοκίμια από κάθε μονωτήρα αποτύχει), να πραγματοποιηθεί μια αναθεώρηση του Προτύπου IEC 62217 [151], όσον αφορά την ένταση της δοκιμής ή το αποδεκτό ποσοστό επιτυχών δοκιμίων ώστε να θεωρείται επιτυχής η δοκιμή. Δηλαδή, η δοκιμή, σε αυτήν την περίπτωση, είτε θα πρέπει να γίνει πιο ήπια, μειώνοντας τον χρόνο των 15 λεπτών, ή μειώνοντας την περιεκτικότητα του διεισδυτικού υγρού στο διάλυμα, ή αντικαθιστώντας το διεισδυτικό

υγρό με κάποιο πιο ήπιο, είτε θα πρέπει να αλλάξει το ποσοστό επιτυχών δοκιμών ώστε να θεωρείται επιτυχής η δοκιμή. Από τα αποτελέσματα αυτής της διδακτορικής διατριβής προτείνεται η συνθήκη: τουλάχιστον 70% των δοκιμών να περάσουν επιτυχώς τη δοκιμή ώστε το αποτέλεσμα της να θεωρείται επιτυχές.

Επίσης, παρατηρώντας τα αποτελέσματα του πίνακα 3-28 φαίνεται ότι το αποτέλεσμα της δοκιμής αυτής δεν έχει κάποια συσχέτιση με τα χρόνια λειτουργίας των συνθετικών μονωτήρων στο δίκτυο. Παρατηρούμε ότι, ορισμένοι μεταχειρισμένοι μονωτήρες είχαν χειρότερο αποτέλεσμα από τους αντίστοιχους καινούριους (όπως όλοι οι UB2), κάποιοι έφεραν το ίδιο αποτέλεσμα (όπως οι UA2) και κάποιοι καλύτερο αποτέλεσμα (όπως οι UA1, UB1 και UE1).

Επιπλέον, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των καινούριων μονωτήρων των διαφορετικών κατασκευαστών βλέπουμε ότι αυτοί κατατάσσονται με την ακόλουθη σειρά (φθίνουσα σειρά όσον αφορά το ποσοστό επιτυχίας τους στη δοκιμή διείσδυσης βαφής): A2, B2, C1, C2, D2 με ποσοστό 80%, E1 με 70%, D1 με 60%, F1 με 38%, B1 με 13% και A1 με 10%. Από τα παραπάνω φαίνεται πως οι συνθετικοί μονωτήρες ανάρτησης έχουν καλύτερα αποτελέσματα στη δοκιμή αυτή από τους μονωτήρες στήριξης (με εξαίρεση τους μονωτήρες C2), γεγονός που ίσως οφείλεται σε διαφορές στην κατασκευαστική διαδικασία τους.

Τέλος, στον πίνακα 3-29 παρουσιάζεται μία σύγκριση και συσχέτιση των αποτελεσμάτων της δοκιμής διάχυσης νερού (πίνακας 3-27) με τα αποτελέσματα της δοκιμής διείσδυσης βαφής (πίνακας 3-28). Με **κόκκινο χρώμα** έχουν επισημανθεί τα «κακά» αποτελέσματα ανά δοκιμή, δηλαδή: α) αυξημένα ρεύματα διαρροής ($> 90 \mu\text{A}$ στα 12 kV, $> 100 \mu\text{A}$ στα 18 kV) στη δοκιμή διάχυσης νερού και β) μικρό ποσοστό επιτυχίας ($< 40 \%$) στη δοκιμή διείσδυσης βαφής. Με **πράσινο χρώμα** επισημάνθηκαν τα «καλά» αποτελέσματα ανά δοκιμή, δηλαδή: α) μειωμένα ρεύματα διαρροής ($< 80 \mu\text{A}$ στα 12 kV, $< 85 \mu\text{A}$ στα 18 kV) στη δοκιμή διάχυσης νερού και β) σχετικά υψηλό ποσοστό επιτυχίας ($\geq 60 \%$, αν και το συνολικό αποτέλεσμα ήταν ανεπιτυχές) στη δοκιμή διείσδυσης βαφής. Σημειώνεται ότι στους ανωτέρω υπολογισμούς των ρευμάτων διαρροής δε ελήφθησαν υπόψιν τα δοκίμια στα οποία συνέβη υπερπήδηση. Επίσης, με **έντονη γραμματοσειρά** επισημάνθηκαν τα αποτελέσματα τα οποία βρίσκονται σε συμφωνία και στις δύο δοκιμές, δηλαδή καλό αποτέλεσμα με καλό αποτέλεσμα και κακό αποτέλεσμα με κακό αποτέλεσμα. Από τα αποτελέσματα με έντονη γραμματοσειρά παρατηρούμε ότι βρίσκονται σε συμφωνία

μεταξύ των δύο δοκιμών σε 12 από τους 19 μονωτήρες που ελέγχθηκαν (ή εκφρασμένο σε ποσοστό: 63%). Έτσι, φαίνεται ότι το μέγεθος του ρεύματος διαρροής που εμφανίζεται στη δοκιμή διάχυσης νερού, σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να προιδεάσει για το αποτέλεσμα της δοκιμής διείσδυσης βαφής.

Πίνακας 3-29. Σύγκριση και συσχέτιση των αποτελεσμάτων των δοκιμών: διάχυσης νερού και διείσδυσης βαφής.

Μονωτήρας	Χρόνια στο δίκτυο	Δοκιμή διάχυσης νερού		Αποτέλεσμα δοκιμής διείσδυσης βαφής (% των δοκιμών που πέρασαν επιτυχώς)
		Μέση τιμή ρεύματος διαρροής στα 12 kV [μΑ]	Μέση τιμή ρεύματος διαρροής στα 18 kV [μΑ]	
UE1	3	108	198	90%
A2	0	40	60	80%
UA2	2	37	59	80%
UB1 (2η Ομάδα)	10	701	143	80%
B2	0	41	62	80%
C1	0	43	65	80%
C2	0	88	175	80%
D2	0	47	66	80%
UB1 (1η Ομάδα)	10	170	Υπερπήδηση όλων	71%
E1	0	80	86	70%
UB1 (3η Ομάδα)	4	58	85	60%
D1	0	50	75	60%
F1	0	84	95	38%
UA1	2	61	94	33%
UB2 (3η Ομάδα)	10	206	212	29%
UB2 (1η Ομάδα)	10	139	188	17%
UB2 (2η Ομάδα)	5	40	61	17%
B1	0	52	77	13%
A1	0	94	148	10%

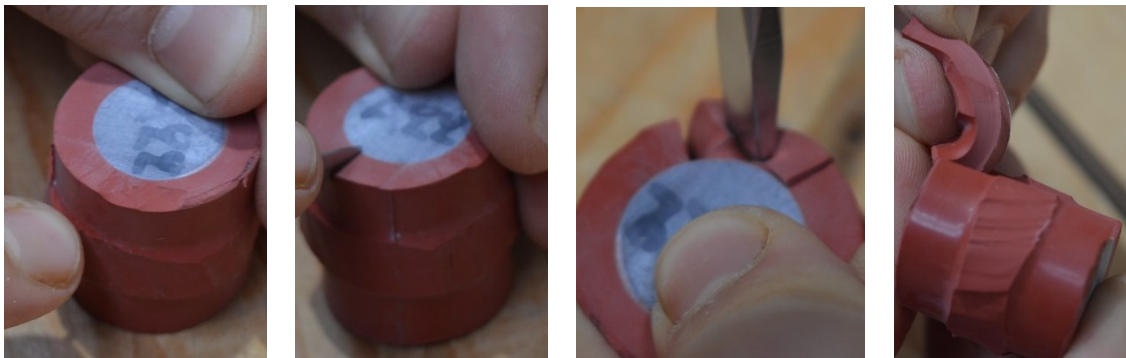
3.4.3 Διερεύνηση της σύνδεσης της ράβδου με το μονωτικό περίβλημα (adhesion test)

Όπως ειπώθηκε και στο υποκεφάλαιο 2.2.3 της παρούσης διδακτορικής διατριβής, ιδιαίτερο ενδιαφέρον στον έλεγχο της καλής ποιότητας κατασκευής των συνθετικών

μονωτήρων παρουσιάζει η διερεύνηση της ποιότητας της σύνδεσης μεταξύ του μονωτικού περιβλήματος και της ράβδου. Ακόμη δεν υπάρχει κάποιο πρότυπο το οποίο να περιγράφει τη δοκιμή που να εξετάζει αυτό το θέμα.

Η δοκιμή που εκτελέστηκε για τη διερεύνηση της σύνδεσης μεταξύ της ράβδου και του μονωτικού περιβλήματος είναι μια **προσθήκη μετά την εκτέλεση της δοκιμής διάχυσης νερού (water diffusion)**. Μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής διάχυσης νερού (και τον βρασμό των δοκιμίων για $100 \pm 0,5$ ώρες μέσα σε διάλυμα απιονισμένου νερού με 0,1% κατά βάρος χλωριούχο νάτριο (NaCl)) εκτελέστηκε στα ίδια δοκίμια η παρακάτω διαδικασία. Με ένα μαχαίρι χαρασσόταν ένα μικρό κομμάτι περίπου 1 cm σε κάθε δοκίμιο, έπειτα πιεζόταν με ένα κατσαβίδι για να γίνει η αρχή προσέχοντας να μην ακουμπήσει το μαχαίρι τη ράβδο, αλλά μόνο το σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) και μετά τραβούσαμε το κομμάτι με μία πένσα ή με το χέρι. Αν το κομμάτι που τραβούσαμε κοβόταν στο ενδιάμεσο λόγω κακής αντοχής του silicone rubber σε σκίσιμο (tear strength) τότε επαναλαμβάναμε από την κάτω πλευρά του δοκιμίου με το κατσαβίδι και ξανατραβάγαμε. Τα βήματα της διαδικασίας αυτής φαίνονται καλύτερα στο σχήμα 3-100.

Η δοκιμή εκτελέστηκε στα 6 δοκίμια από κάθε τύπο μονωτήρα στα οποία εκτελέστηκε η δοκιμή διάχυσης νερού. Σε όποιον μονωτήρα δεν υπήρχε επάρκεια υλικού για τη δημιουργία δοκιμίων, αρκεστήκαμε σε λιγότερα δοκίμια.



Σχήμα 3-100. Βήματα της διαδικασίας ελέγχου της σύνδεσης ράβδου – μονωτικού περιβλήματος με την προσθήκη στη δοκιμή διάχυσης νερού (water diffusion test).

Τα αποτελέσματα φαίνονται αναλυτικά με φωτογραφίες στο **Παράρτημα Δ** της παρούσης διδακτορικής διατριβής, αλλά και συγκεντρωτικά στον πίνακα 3-30. Επίσης, στον πίνακα 3-30 έχουν προστεθεί και τα αποτελέσματα του πίνακα 3-27 (της δοκιμής διάχυσης νερού) έτσι ώστε να είναι πιο εύκολες οι συγκρίσεις. Οι ορολογίες «Σκίσιμο» και «Αποκόλληση» που χρησιμοποιούνται στον πίνακα 3-30, αντιστοιχούν στις ορολογίες «Cohesive failure» και «Adhesive failure» αντίστοιχα οι οποίες εξηγούνται στα σχήματα 2-40 και 2-41.

Προφανώς, για να είναι καλή η σύνδεση μεταξύ της ράβδου και του μονωτικού περιβλήματος, θα πρέπει να συμβαίνει «Σκίσιμο» του μονωτικού περιβλήματος και όχι «Αποκόλληση» του από τη ράβδο.

Πίνακας 3-30. Επέκταση των αποτελεσμάτων του Πίνακα 3-27 στον οποίο περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα της δοκιμής ελέγχου της σύνδεσης του μονωτικού περιβλήματος στην ράβδο των συνθετικών μονωτήρων. Ο όρος «Σκίσιμο» και ο όρος «Αποκόλληση» αντιστοιχούν στους όρους «Cohesive failure» και «Adhesive failure», αντίστοιχα, οι οποίοι εξηγούνται στα σχήματα 2-40 και 2-41.

Μονωτήρες	Αριθμός μονωτήρα	Αριθμός δοκιμίου	Ρεύμα διαρροής στα 12 kV [μΑ]	Ρεύμα διαρροής στα 18 kV [μΑ]	Σύνδεση ράβδου - μονωτικού περιβλήματος
A1	6	1	117	165	Σκίσιμο
	8	2	90	154	Σκίσιμο
	9	3	110	192	Σκίσιμο
	9	4	93	136	Σκίσιμο
	9	5	76	122	20% Αποκόλληση
	9	6	79	117	Σκίσιμο
UA1	2	1	55	90	Σκίσιμο
	2	2	57	97	10% Αποκόλληση
	2	3	61	102	5% Αποκόλληση
	2	4	55	86	Σκίσιμο
	3	5	75	Υπερπήδηση στα 13,6 kV	50% Αποκόλληση
	-	6	-	-	-
A2	2	1	40	60	20% Αποκόλληση
	2	2	39	59	50% Αποκόλληση
	2	3	39	60	50% Αποκόλληση
	2	4	41	61	30% Αποκόλληση
	2	5	40	60	20% Αποκόλληση
	2	6	40	60	Σκίσιμο
UA2	2	1	Υπερπήδηση στα 12 kV		Σκίσιμο
	2	2	Υπερπήδηση στα 12 kV		10% Αποκόλληση
	2	3	38	58	Σκίσιμο
	2	4	40	60	Σκίσιμο
	2	5	35	59	Σκίσιμο
	2	6	35	60	Σκίσιμο
B1	1	1	52	78	Σκίσιμο
	1	2	50	75	Σκίσιμο

	1	3	54	80	Σκίσιμο
	1	4	52	76	Σκίσιμο
	-	5	-	-	-
	-	6	-	-	-
UB1 (1η Ομάδα)	1	1	Υπερπήδηση στα 10,6 kV		60% Αποκόλληση
	1	2	Υπερπήδηση στα 8,7 kV		70% Αποκόλληση
	1	3	Υπερπήδηση στα 8,3 kV		50% Αποκόλληση
	1	4	167	Υπερπήδηση στα 15 kV	40% Αποκόλληση
	2	5	173	Υπερπήδηση στα 16,9 kV	90% Αποκόλληση
	2	6	170	Υπερπήδηση στα 15,9 kV	40% Αποκόλληση
UB1 (2η Ομάδα)	4	1	117	Υπερπήδηση στα 17,7 kV	100% Αποκόλληση
	4	2	87	143	100% Αποκόλληση
	5	3	1900	Υπερπήδηση στα 17 kV	90% Αποκόλληση
	-	4	-	-	-
	-	5	-	-	-
	-	6	-	-	-
UB1 (3η Ομάδα)	7	1	62	Εσωτερικό τόξο στα 13 kV	Σκίσιμο
	7	2	Εσωτερικό τόξο στα 7,9 kV		Σκίσιμο
	8	3	54	82	Σκίσιμο
	8	4	57	88	Σκίσιμο
	-	5	-	-	-
	-	6	-	-	-
B2	1	1	42	64	Σκίσιμο
	1	2	41	60	Σκίσιμο
	1	3	41	62	Σκίσιμο
	1	4	41	63	Σκίσιμο
	1	5	41	62	Σκίσιμο
	-	6	-	-	-
UB2 (1η Ομάδα)	2	1	120	190	70% Αποκόλληση

	2	2	117	Υπερπή- δηση στα 17,1 kV	80% Αποκόλληση
	2	3	116	190	50% Αποκόλληση
	2	4	120	185	40% Αποκόλληση
	2	5	222	Υπερπή- δηση στα 17,3 kV	70% Αποκόλληση
	-	6	-	-	-
UB2 (2η Ομάδα)	7	1	40	60	Σκίσιμο
	7	2	40	60	Σκίσιμο
	7	3	41	61	Σκίσιμο
	7	4	40	60	Σκίσιμο
	7	5	41	62	Σκίσιμο
	7	6	40	60	Σκίσιμο
UB2 (3η Ομάδα)	8	1	82	303	Σκίσιμο
	8	2	62	120	Σκίσιμο
	8	3	840	Υπερπή- δηση στα 14,8 kV	Σκίσιμο
	8	4	121	Υπερπή- δηση στα 14,8 kV	Σκίσιμο
	8	5	68	Υπερπή- δηση στα 17,7 kV	Σκίσιμο
	8	6	62	Υπερπή- δηση στα 17,5 kV	Σκίσιμο
C1	1	1	44	65	Σκίσιμο
	1	2	43	64	10% Αποκόλληση
	1	3	43	64	20% Αποκόλληση
	3	4	43	65	Σκίσιμο
	4	5	43	63	Σκίσιμο
	4	6	43	66	Σκίσιμο
C2	2	1	40	61	10% Αποκόλληση
	2	2	40	58	20% Αποκόλληση
	2	3	39	59	20% Αποκόλληση
	4	4	148	307	100% Αποκόλληση
	4	5	141	308	100% Αποκόλληση
	4	6	121	258	100% Αποκόλληση

D1	1	1	50	75	Σκίσιμο
	1	2	51	76	Σκίσιμο
	1	3	50	75	Σκίσιμο
	1	4	51	77	Σκίσιμο
	1	5	51	76	Σκίσιμο
	4	6	49	73	Σκίσιμο
D2	2	1	55	71	Σκίσιμο
	2	2	57	71	Σκίσιμο
	2	3	43	64	Σκίσιμο
	2	4	43	65	Σκίσιμο
	2	5	43	63	Σκίσιμο
	2	6	42	63	Σκίσιμο
E1	2	1	110	110	Σκίσιμο
	2	2	114	Υπερπή- δηση στα 17,5 kV	10% Αποκόλληση
	2	3	46	71	10% Αποκόλληση
	2	4	49	76	20% Αποκόλληση
	-	5	-	-	-
	-	6	-	-	-
UE1	1	1	86	147	40% Αποκόλληση
	1	2	91	150	90% Αποκόλληση
	1	3	90	151	Σκίσιμο
	9	4	161	330	40% Αποκόλληση
	9	5	74	122	100% Αποκόλληση
	9	6	146	286	80% Αποκόλληση
F1	1	1	120	110	100% Αποκόλληση
	2	2	48	79	Σκίσιμο
	-	3	-	-	-
	-	4	-	-	-
	-	5	-	-	-
	-	6	-	-	-

Πίνακας 3-31. Ποιότητα της σύνδεσης της ράβδου με το μονωτικό περιβλήμα των εξεταζόμενων μονωτήρων (συμπυγμένα αποτελέσματα της τελευταίας δεξιά στήλης του πίνακα 3-30) και αποτελέσματα των δοκιμών διάχυσης νερού και διείσδυσης βαφής του πίνακα 3-29. Με πράσινο χρώμα έχει σημειωθεί το «καλό», με κίτρινο το «μέτριο» και με κόκκινο το «κακό» αποτέλεσμα ανά δοκιμή.

Μονωτήρας	Χρόνια στο δίκτυο	Δοκιμή διάχυσης νερού		Αποτέλεσμα δοκιμής διείσδυσης βαφής	Σύνδεση ράβδου - μονωτικού περιβλήματος		
		Μέση τιμή ρεύματος διαρροής στα 12 kV [μΑ]	Μέση τιμή ρεύματος διαρροής στα 18 kV [μΑ]		Καλή	Μέτρια	Κακή
A1	0	94	148	10%	✓		
UA1	2	61	94	33%		✓	
A2	0	40	60	80%			✓
UA2	2	37	59	80%	✓		
B1	0	52	77	13%	✓		
UB1 (1η Ομάδα)	10	170	Υπερπήδηση όλων	71%			✓
UB1 (2η Ομάδα)	10	701	143	80%			✓
UB1 (3η Ομάδα)	4	58	85	60%	✓		
B2	0	41	62	80%	✓		
UB2 (1η Ομάδα)	10	139	188	17%			✓
UB2 (2η Ομάδα)	5	40	61	17%	✓		
UB2 (3η Ομάδα)	10	206	212	29%	✓		
C1	0	43	65	80%	✓		
C2	0	88	175	80%			✓
D1	0	50	75	60%	✓		
D2	0	47	66	80%	✓		
E1	0	80	86	70%		✓	
UE1	3	108	198	90%			✓
F1	0	84	95	38%		✓	

Στον πίνακα 3-31 έχει γίνει μια σύμπτυξη των αποτελεσμάτων της τέρμα δεξιά στήλης του πίνακα 3-30 ώστε να είναι πιο ευανάγνωστα, καθώς επίσης έχουν προστεθεί τα επίσης συμπυγμένα αποτελέσματα των δοκιμών διάχυσης νερού και διείσδυσης βαφής του πίνακα 3-29, ώστε να μπορούν να γίνουν πιο εύκολα συγκρίσεις και συσχετίσεις των αποτελεσμάτων των δοκιμών. Με **κόκκινο χρώμα** έχουν επισημανθεί τα «κακά» αποτελέσματα ανά δοκιμή, δηλαδή: α) αυξημένα ρεύματα διαρροής (> 90 μΑ στα 12 kV, > 100 μΑ στα 18 kV) στη δοκιμή διάχυσης νερού, β) μικρό ποσοστό επιτυχίας (< 40 %) στη δοκιμή διείσδυσης βαφής και γ) εμφάνιση αποκόλλησης σε τουλάχιστον 2 δοκίμια με ποσοστό $\geq 50\%$. Με **πράσινο χρώμα** επισημάνθηκαν τα «καλά» αποτελέσματα ανά δοκιμή,

δηλαδή: α) μειωμένα ρεύματα διαρροής ($< 80 \mu\text{A}$ στα 12 kV, $< 85 \mu\text{A}$ στα 18 kV) στη δοκιμή διάχυσης νερού, β) σχετικά υψηλό ποσοστό επιτυχίας ($\geq 60 \%$, αν και το συνολικό αποτέλεσμα ήταν ανεπιτυχές) στη δοκιμή διείσδυσης βαφής και γ) εμφάνιση αποκόλλησης το πολύ σε 2 δοκίμια με ποσοστό $\leq 20 \%$. Τέλος, με **κίτρινο χρώμα** επισημάνθηκαν όλες οι περιπτώσεις που δεν ανήκαν στις δύο προηγούμενες.

Έτσι, από τον πίνακα 3-31 έχουμε τα παρακάτω συμπεράσματα σχετικά με τις συσχετίσεις των αποτελεσμάτων της δοκιμής σύνδεσης της ράβδου με το μονωτικό περίβλημα με τις άλλες δύο δοκιμές. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα με κίτρινο χρώμα δε λαμβάνονται υπόψιν στους ακόλουθους υπολογισμούς.

- Σύμφωνα με τον πίνακα 3-31, υπάρχει συμφωνία αποτελεσμάτων μεταξύ της Δοκιμής σύνδεσης της ράβδου με το μονωτικό περίβλημα και της Δοκιμής διάχυσης νερού σε 13 από τους 16 μονωτήρες που ελέγχθηκαν (ή εκφρασμένο σε ποσοστό: 81 %).
- Σύμφωνα με τον πίνακα 3-31, υπάρχει συμφωνία αποτελεσμάτων μεταξύ της Δοκιμής σύνδεσης της ράβδου με το μονωτικό περίβλημα και της Δοκιμής διείσδυσης βαφής σε 7 από τους 16 μονωτήρες που ελέγχθηκαν (ή εκφρασμένο σε ποσοστό: 44 %).

Επομένως από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι τα ρεύματα διαρροής που μετρούνται κατά τη δοκιμή διάχυσης νερού μπορούν να προϋδεάσουν σε ικανοποιητικό βαθμό για τη σύνδεση μεταξύ ράβδου και μονωτικού περιβλήματος, κάτι το οποίο δεν ισχύει για τη δοκιμή διείσδυσης βαφής.

Επιπλέον, στον πίνακα 3-30 και σε πιο συμπυγμένη μορφή στον πίνακα 3-31 παρατηρούμε ότι σε αρκετούς μονωτήρες η σύνδεση της ράβδου με το μονωτικό περίβλημα τους ήταν κακή και σε ορισμένες περιπτώσεις το μονωτικό περίβλημα αφαιρέθηκε εξ' ολοκλήρου από τη ράβδο. Επομένως, είναι σημαντικό να ενσωματωθεί η δοκιμή αυτή σε κάποιο διεθνές Πρότυπο, ώστε να εξασφαλίζεται η καλή ποιότητα κατασκευής των συνθετικών μονωτήρων.

Τέλος, από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον πίνακα 3-31 δε φαίνεται να υπάρχει συσχέτιση του αποτελέσματος της δοκιμής αυτής με τη γήρανση του κάθε μονωτήρα.

3.5 Διερεύνηση της μηχανικής αντοχής των συνθετικών μονωτήρων

Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα των δοκιμών μηχανικής αντοχής στους καινούριους – αχρησιμοποίητους μονωτήρες του κατασκευαστή Α.

3.5.1 Διερεύνηση της αντοχής των συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης σε φορτίο εφελκυσμού

Η δοκιμή εφελκυσμού πραγματοποιήθηκε στους καινούριους – αχρησιμοποίητους συνθετικούς μονωτήρες ανάρτησης, οι οποίοι δεν είχαν χρησιμοποιηθεί (καταστραφεί) για την εκτέλεση άλλων δοκιμών. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61109 [183], η διαδικασία του οποίου έχει περιγραφεί διεξοδικά στο υποκεφάλαιο 2.3.1 της παρούσης διδακτορικής διατριβής. Επίσης, εφαρμόστηκε μια διαδικασία που δεν περιγράφεται στο Πρότυπο IEC 61109 [183] (εκδοχή Β – υποκεφάλαιο 3.5.1.2) για να εξεταστεί η ποιότητα του «πρεσαρίσματος» των μεταλλικών ακροδεκτών στα άκρα της ράβδου των συνθετικών μονωτήρων.

Εκτελέστηκαν τρεις διαφορετικές εκδοχές για τη δοκιμή εφελκυσμού συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης για να διαφανεί η καλύτερη από τη σκοπιά της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, αλλά και από τη σκοπιά της όσο το δυνατόν μεγαλύτερης εξοικονόμησης χρόνου κατά τη δοκιμή.

3.5.1.1 Εκδοχή Α: Γρήγορη δοκιμή εφελκυσμού

Εκτελέστηκαν δύο δοκιμές του Προτύπου IEC 61109 [183]. Η πρώτη δοκιμή που εκτελέστηκε αναφέρεται στην §13.1 (δοκιμή σειράς - routine test) του IEC 61109 [183]. Κατά τη δοκιμή αυτή αυξάναμε το φορτίο εφελκυσμού των συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης ομαλά μέχρι το μισό του καθορισμένου φορτίου εφελκυσμού (specified mechanical load – SML), δηλαδή μέχρι τα $0,5 \times \text{SML}$ (120kN) = 60 kN (routine test load - RTL). Στη συνέχεια, η δύναμη αυτή διατηρούταν σταθερή για 15 s (το Πρότυπο IEC 61109 [183] απαιτεί τουλάχιστον 10 s). Ακολούθως, εφαρμόστηκε η διαδικασία που αναφέρεται στην τελευταία παράγραφο της §11.2.2 του IEC 61109 [183], σύμφωνα με την οποία αυξάναμε το φορτίο εφελκυσμού ομαλά μέχρι ο μονωτήρας να αστοχήσει και καταγραφόταν η τιμή της δύναμης στην οποία αστόχησε.

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο σχήμα 3-101. Η δοκιμή εκτελέστηκε σε 8 μονωτήρες του κατασκευαστή Α. Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής και οι μονωτήρες στους οποίους πραγματοποιήθηκε φαίνονται στον πίνακα 3-32.



Σχήμα 3-101. Ο μονωτήρας A216 τοποθετημένος στη μηχανή εφελκυσμού για τη διεξαγωγή της δοκιμής εφελκυσμού (Έκδοση Α).

Πίνακας 3-32. Δοκιμή στο μισό φορτίο του καθορισμένου φορτίου εφελκυσμού (specified mechanical load – SML), δηλαδή στα 60 kN (RTL) για 15 s και αύξηση του φορτίου μέχρι το φορτίο αστοχίας. Επίσης, φαίνεται το είδος αστοχίας που συνέβη στον κάθε μονωτήρα.

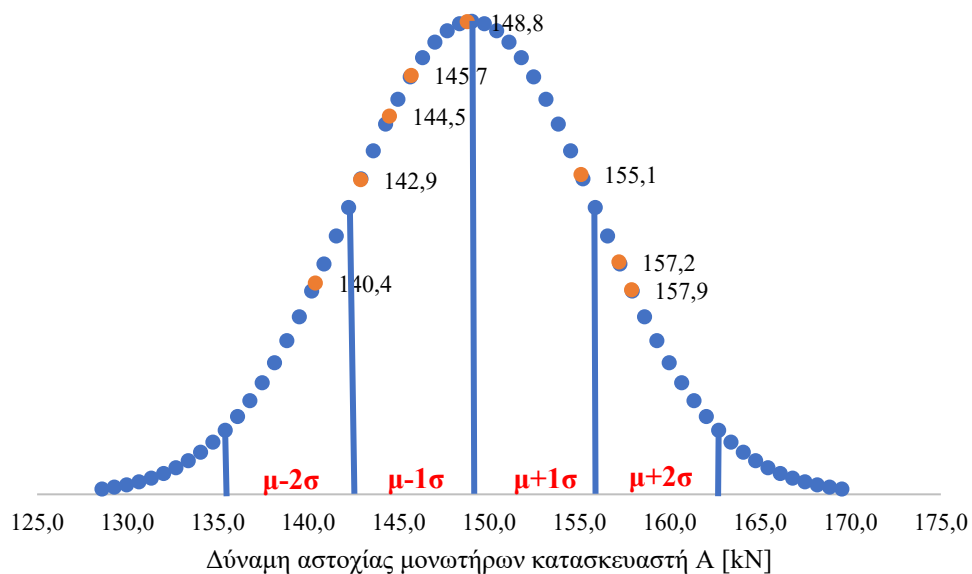
Μονωτήρας	RTL (επιτυχία/ αποτυχία)	Αστοχία [kN]	Ποσοστό επί του SML (120 kN) [%]	Είδος αστοχίας
A213	επιτυχία	155,1	129,3	Σπάσιμο του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
A214	επιτυχία	157,9	131,6	Σπάσιμο του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
A215	επιτυχία	142,9	119,1	Σπάσιμο του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
A216	επιτυχία	145,7	121,4	Σπάσιμο του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
A217	επιτυχία	148,8	124,0	Σπάσιμο του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
A218	επιτυχία	157,2	131,0	Σπάσιμο του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
A219	επιτυχία	140,4	117,0	Σπάσιμο του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
A220	επιτυχία	144,5	120,4	Σπάσιμο του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
Μέσος όρος [kN]		149,1	124,2	
Τυπική απόκλιση [kN]		6,8	5,7	

Από τον πίνακα 3-32 παρατηρούμε ότι όλοι οι μονωτήρες πέρασαν με επιτυχία τη δοκιμή ρουτίνας στο φορτίο δοκιμής ρουτίνας (RTL) 60 kN για 15 s. Επίσης, παρατηρούμε ότι τα φορτία αστοχίας όλων των μονωτήρων που δοκιμάστηκαν ήταν υψηλότερα από το καθορισμένο φορτίο εφελκυσμού (specified mechanical load – SML) των μονωτήρων αυτών (120 kN) κατά 17 % - 31,6 %, καθώς επίσης ότι το είδος αστοχίας τους ήταν το ίδιο σε όλους τους μονωτήρες (συγκεκριμένα σε όλους τους μονωτήρες έσπασε ο κάτω μεταλλικός ακροδέκτης τους, όπως φαίνεται στο σχήμα 3-102). Επίσης, δοκιμάστηκε, με τον ίδιο τρόπο, και ο μονωτήρας D210 περνώντας και αυτός με επιτυχία τη δοκιμή ρουτίνας (RTL) και κατέληξε και αυτός με σπασμένο τον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη στα

138,2 kN (115,2% του SML του (120 kN)). Δε δοκιμάστηκαν άλλοι μονωτήρες του κατασκευαστή D επειδή ήταν περιορισμένοι σε αριθμό και δε θα επαρκούσαν για τις υπόλοιπες δοκιμές. Στο υποκεφάλαιο 2.3.1 της παρούσης διατριβής αναφέρονται οι πιο αποδεκτοί και οι λιγότερο αποδεκτοί τρόποι αστοχίας των συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης κατά τη δοκιμή εφελκυσμού. Το σπάσιμο των μεταλλικών ακροδεκτών αναφέρεται ως ένας από τους πιο αποδεκτούς τρόπους αστοχίας.



Σχήμα 3-102. α) Ο μονωτήρας A217 μετά την αστοχία του στη μηχανή εφελκυσμού και β) κοντινή όψη του σπασμένου κάτω μεταλλικού ακροδέκτη του μονωτήρα A217.



Σχήμα 3-103. Κανονική κατανομή για τις δυνάμεις αστοχίας των συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης του κατασκευαστή A κατά τη δοκιμή εφελκυσμού (εκδοχή A).

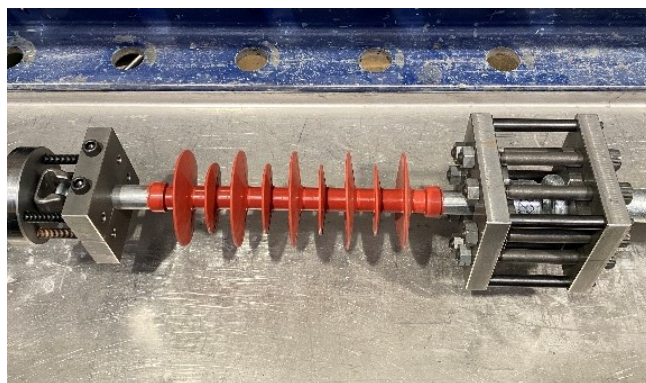
Επίσης, στο σχήμα 3-103 φαίνονται τα αποτελέσματα της αστοχίας των μονωτήρων που δοκιμάστηκαν τοποθετημένα στην κανονική κατανομή, ώστε να φανεί η απόκλιση που είχαν μεταξύ τους. Στο σχήμα 3-103 με «μ» συμβολίζεται η μέση τιμή των μετρήσεων της

δύναμης αστοχίας (σε kN) και με «σ» η τυπική απόκλιση αυτών (σε kN). Από το σχήμα 3-103 παρατηρούμε ότι η αστοχία των μονωτήρων εμφάνισε αρκετά μικρή απόκλιση από τη μέση τιμή, γεγονός το οποίο σημαίνει καλή κατασκευαστική διαδικασία.

3.5.1.2 Εκδοχή B: Γρήγορη δοκιμή εφελκυσμού με ενσωμάτωση ειδικής κατασκευής στους μεταλλικούς ακροδέκτες

Κατά την εκδοχή A της δοκιμής εφελκυσμού παρατηρήθηκε ότι σε όλους τους μονωτήρες, που δοκιμάστηκαν, έσπασε ο κάτω μεταλλικός ακροδέκτης. Ως εκ τούτου, με αυτή τη δοκιμή δε μπόρεσε να διαφανεί το πόσο καλά και σωστά ήταν «πρεσαρισμένοι» οι μεταλλικοί ακροδέκτες επάνω στη ράβδο των μονωτήρων και άρα δε μπορούσαμε να έχουμε εικόνα για την ποιότητα της διαδικασίας πρεσαρίσματος (crimping process) κατά την κατασκευαστική διαδικασία των μονωτήρων.

Γι' αυτόν τον λόγο έγινε μια προσθήκη στη διαδικασία της εκδοχής A της δοκιμής εφελκυσμού. Πιο συγκεκριμένα, προσαρμόστηκαν δύο ειδικές μεταλλικές κατασκευές στους δύο μεταλλικούς ακροδέκτες των μονωτήρων υπό δοκιμή, οι οποίες εξασφάλιζαν ότι δε θα αστοχήσουν (σπάσουν) οι μεταλλικοί ακροδέκτες και άρα θα ελεγχόταν η μηχανική αντοχή της ράβδου και η ποιότητα του πρεσαρίσματος των μεταλλικών ακροδεκτών σε αυτήν (crimping process). Αυτές οι ειδικές μεταλλικές κατασκευές φαίνονται στο σχήμα 3-104 προσαρμοσμένες στα άκρα ενός μονωτήρα ανάρτησης του κατασκευαστή A.

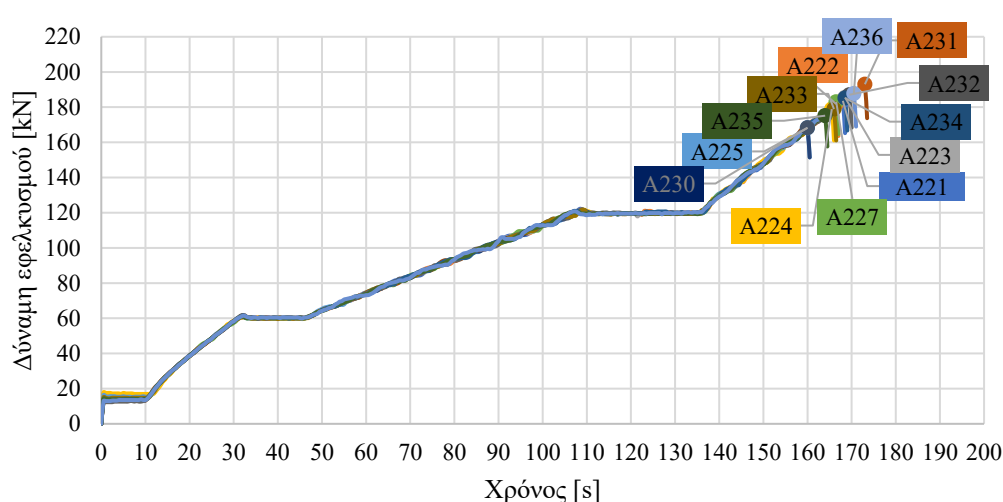


Σχήμα 3-104. Οι ειδικές μεταλλικές κατασκευές που προσαρμόστηκαν στους μεταλλικούς ακροδέκτες των συνθετικών μονωτήρων κατά τη δοκιμή εφελκυσμού (εκδοχή B).

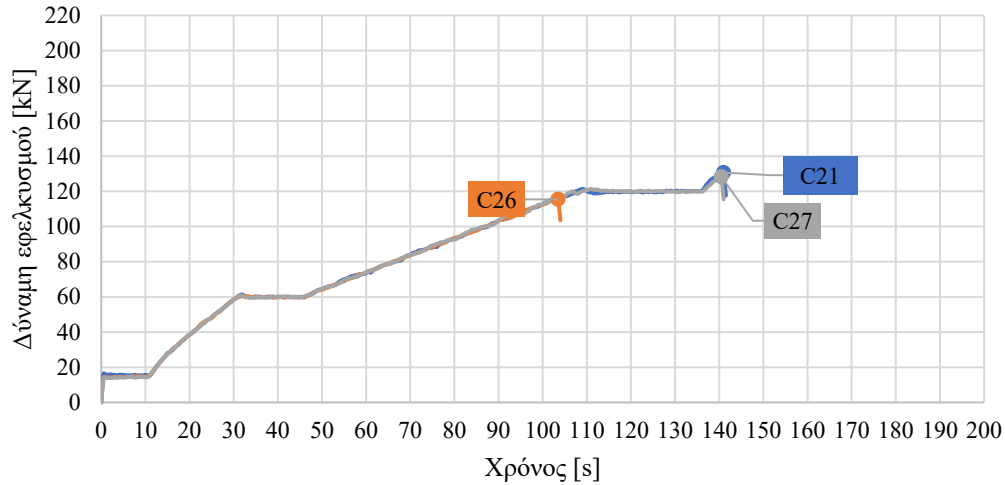
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την εκδοχή B της δοκιμής εφελκυσμού ήταν η ακόλουθη: αρχικά, αυξάναμε το φορτίο εφελκυσμού των συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης ομαλά μέχρι το μισό του καθορισμένου φορτίου εφελκυσμού (specified

mechanical load – SML), δηλαδή μέχρι τα $0,5 \times \text{SML} (120\text{kN}) = 60 \text{ kN}$ (routine test load - RTL) (§13.1 (δοκιμή σειράς - routine test) του IEC 61109 [183]). Στη συνέχεια, η δύναμη αυτή διατηρούταν σταθερή για 15 s (το Πρότυπο IEC 61109 [183] απαιτεί τουλάχιστον 10 s). Ακολούθως, η δύναμη εφελκυσμού αυξανόταν γρήγορα και ομαλά μέχρι να φτάσει το SML (120 kN για όλους τους δοκιμαζόμενους μονωτήρες) και παρέμενε σταθερή για 30 s. Τέλος, εφαρμόστηκε η διαδικασία που αναφέρεται στην τελευταία παράγραφο της §11.2.2 του IEC 61109 [183], σύμφωνα με την οποία αυξάναμε το φορτίο εφελκυσμού ομαλά μέχρι ο μονωτήρας να αστοχήσει και καταγραφόταν η τιμή της δύναμης στην οποία αστόχησε. Η διάρκεια της δοκιμής αυτής ήταν περίπου 3 λεπτά για τον κάθε μονωτήρα και εφαρμόστηκε σε 13 μονωτήρες ανάρτησης του κατασκευαστή A, σε 3 του C και σε 10 του D ανάλογα με τη διαθεσιμότητα μονωτήρων που υπήρχε.

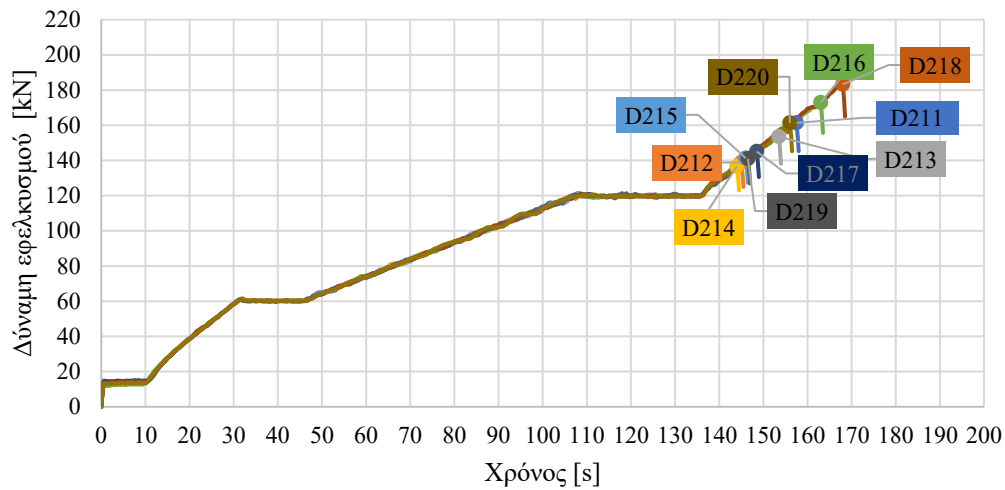
Στα σχήματα 3-105, 3-106 και 3-107 φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις της δύναμης εφελκυσμού συναρτήσει του χρόνου για τους μονωτήρες του κατασκευαστή A, C και D, αντίστοιχα. Επιπλέον, στους πίνακες 3-33 έως 3-35 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα της εκδοχής B της δοκιμής εφελκυσμού στους συγκεκριμένους μονωτήρες. Τέλος, στα σχήματα 3-108 έως και 3-110 φαίνονται τα αποτελέσματα της αστοχίας των μονωτήρων που δοκιμάστηκαν τοποθετημένα σε κανονικές κατανομές για τους μονωτήρες A, C και D αντίστοιχα, ώστε να φανεί η απόκλιση που είχαν μεταξύ τους. Στα σχήματα 3-108 έως 3-110 με «μ» συμβολίζεται η μέση τιμή των μετρήσεων της δύναμης αστοχίας (σε kN) και με «σ» η τυπική απόκλιση αυτών (σε kN).



Σχήμα 3-105. Γραφική παράσταση της δύναμης εφελκυσμού συναρτήσει του χρόνου για 13 μονωτήρες του κατασκευαστή A.



Σχήμα 3-106. Γραφική παράσταση της δύναμης εφελκυσμού συναρτήσει του χρόνου για 3 μονωτήρες του κατασκευαστή C.



Σχήμα 3-107. Γραφική παράσταση της δύναμης εφελκυσμού συναρτήσει του χρόνου για 10 μονωτήρες του κατασκευαστή D.

Πίνακας 3-33. Αποτελέσματα της δοκιμής εφελκυσμού (εκδοχή Β) για τους συνθετικούς μονωτήρες ανάρτησης του κατασκευαστή Α.

Μονωτήρας	RTL (15s) (επιτυχία/ αποτυχία)	SML (30s) (επιτυχία/ αποτυχία)	Αστοχία [kN]	Ποσοστό επί του SML (120 kN) [%]	Είδος αστοχίας
A221	επιτυχία	επιτυχία	183,6	153,0	Ξεγλίστρημα του πάνω μεταλλικού ακροδέκτη
A222	επιτυχία	επιτυχία	181,8	151,5	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
A223	επιτυχία	επιτυχία	185,5	154,6	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
A224	επιτυχία	επιτυχία	178,9	149,1	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
A225	επιτυχία	επιτυχία	168,3	140,2	Ξεγλίστρημα του πάνω μεταλλικού ακροδέκτη
A227	επιτυχία	επιτυχία	183,0	152,5	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
A230	επιτυχία	επιτυχία	168,3	140,2	Ξεγλίστρημα του πάνω μεταλλικού ακροδέκτη
A231	επιτυχία	επιτυχία	193,0	160,8	Ξεγλίστρημα του πάνω μεταλλικού ακροδέκτη
A232	επιτυχία	επιτυχία	187,0	155,9	Ξεγλίστρημα του πάνω μεταλλικού ακροδέκτη
A233	επιτυχία	επιτυχία	178,9	149,1	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
A234	επιτυχία	επιτυχία	185,2	154,3	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη

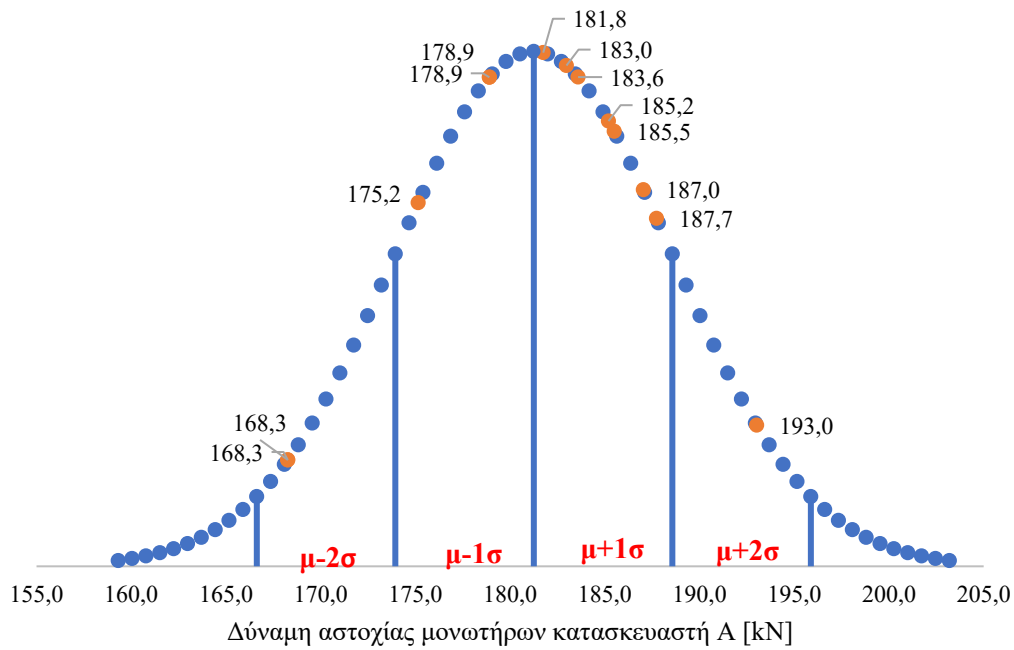
A235	επιτυχία	επιτυχία	175,2	146,0	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
A236	επιτυχία	επιτυχία	187,7	156,4	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
Μέσος όρος [kN]			181,3	151,0	
Τυπική απόκλιση [kN]			7,3	6,1	

Πίνακας 3-34. Αποτελέσματα της δοκιμής εφελκυσμού (εκδοχή Β) για τους συνθετικούς μονωτήρες ανάρτησης του κατασκευαστή C.

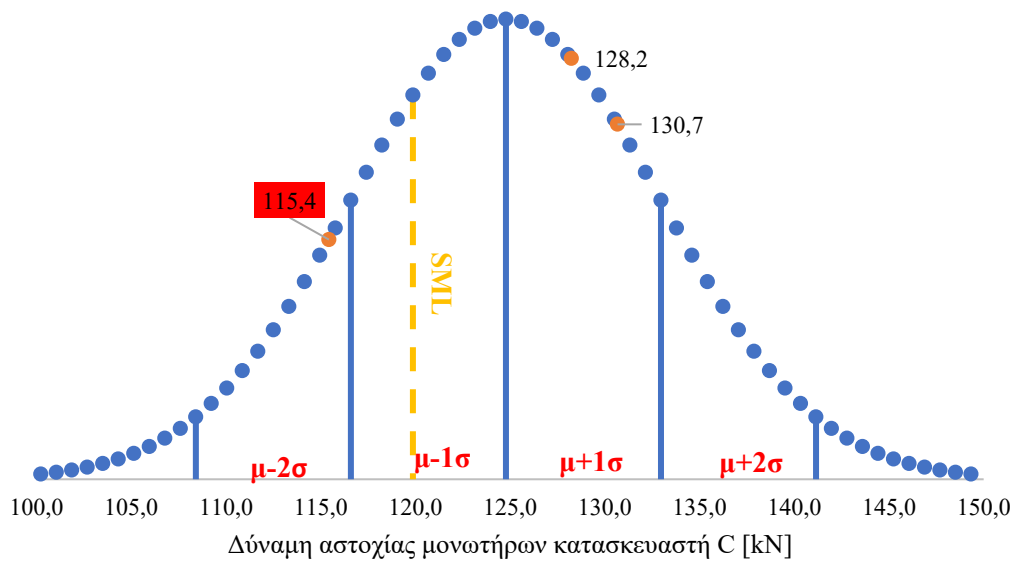
Μονωτήρας	RTL (15s) (επιτυχία/ αποτυχία)	SML (30s) (επιτυχία/ αποτυχία)	Αστοχία [kN]	Ποσοστό επί του SML (120 kN) [%]	Είδος αστοχίας
C21	επιτυχία	επιτυχία	130,7	108,9	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
C26	επιτυχία	αποτυχία	115,4	96,2	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
C27	επιτυχία	επιτυχία	128,2	106,9	Ξεγλίστρημα του πάνω μεταλλικού ακροδέκτη
Μέσος όρος [kN]			124,8		
Τυπική απόκλιση [kN]			8,2		

Πίνακας 3-35. Αποτελέσματα της δοκιμής εφελκυσμού (εκδοχή Β) για τους συνθετικούς μονωτήρες ανάρτησης του κατασκευαστή D.

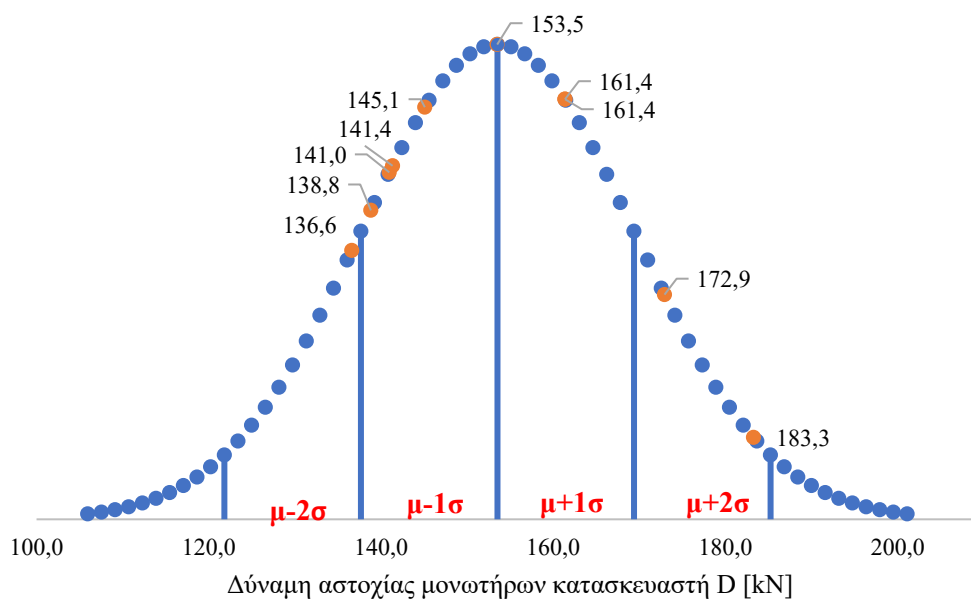
Μονωτήρας	RTL (15s) (επιτυχία/ αποτυχία)	SML (30s) (επιτυχία/ αποτυχία)	Αστοχία [kN]	Ποσοστό επί του SML (120 kN) [%]	Είδος αστοχίας
D211	επιτυχία	επιτυχία	161,4	134,5	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
D212	επιτυχία	επιτυχία	138,8	115,7	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
D213	επιτυχία	επιτυχία	153,5	127,9	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
D214	επιτυχία	επιτυχία	136,6	113,9	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
D215	επιτυχία	επιτυχία	141,4	117,8	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
D216	επιτυχία	επιτυχία	172,9	144,1	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
D217	επιτυχία	επιτυχία	145,1	120,9	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
D218	επιτυχία	επιτυχία	183,3	152,7	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
D219	επιτυχία	επιτυχία	141,0	117,5	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
D220	επιτυχία	επιτυχία	161,4	134,5	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
Μέσος όρος [kN]			153,5	127,9	
Τυπική απόκλιση [kN]			15,9	13,2	



Σχήμα 3-108. Κανονική κατανομή για τις δυνάμεις αστοχίας των συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης του κατασκευαστή A κατά τη δοκιμή εφελκυσμού (εκδοχή B).



Σχήμα 3-109. Κανονική κατανομή για τις δυνάμεις αστοχίας των συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης του κατασκευαστή C κατά τη δοκιμή εφελκυσμού (εκδοχή B).



Σχήμα 3-110. Κανονική κατανομή για τις δυνάμεις αστοχίας των συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης του κατασκευαστή D κατά τη δοκιμή εφελκυσμού (εκδοχή Β).

Στα σχήματα 3-105 και 3-108 και στον πίνακα 3-33 φαίνονται τα αποτελέσματα των συνθετικών μονωτήρων του κατασκευαστή Α στη δοκιμή εφελκυσμού (εκδοχή Β). Από τα αποτελέσματα παρατηρούμε ότι όλοι οι μονωτήρες αστόχησαν σε δύναμη εφελκυσμού μεγαλύτερη από το SML (=120 kN) τους, η οποία κυμάνθηκε από 40,2 % έως 60,8 % του SML γεγονός που δείχνει ότι η μηχανική αντοχή τους ήταν σε πολύ καλά επίπεδα. Επίσης, η αστοχία όλων τους ήταν ξεγλιστρήματα είτε του πάνω, είτε του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη τους. Στο υποκεφάλαιο 2.3.1 της παρούσης διατριβής αναφέρονται οι πιο αποδεκτοί και οι λιγότερο αποδεκτοί τρόποι αστοχίας των συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης κατά τη δοκιμή εφελκυσμού. Το ξεγλιστρήμα των μεταλλικών ακροδεκτών αναφέρεται ως ένας από τους πιο αποδεκτούς τρόπους αστοχίας. Τέλος, από το σχήμα 3-108 παρατηρούμε ότι η αστοχία των περισσότερων μονωτήρων του κατασκευαστή Α εμφάνισε αρκετά μικρή απόκλιση από τη μέση τιμή, γεγονός το οποίο σημαίνει καλή κατασκευαστική διαδικασία.

Αντίστοιχα, στα σχήματα 3-106 και 3-109 και στον πίνακα 3-34 φαίνονται τα αποτελέσματα των συνθετικών μονωτήρων του κατασκευαστή C. Οι μονωτήρες C που δοκιμάστηκαν ήταν μόνο 3 και κατά συνέπεια τα συμπεράσματα μας για αυτούς τους μονωτήρες δεν μπορούν να είναι πλήρως αξιόπιστα. Βέβαια, το γεγονός ότι ένας από τους 3 μονωτήρες του κατασκευαστή C αστόχησε σε δύναμη εφελκυσμού μικρότερη του SML

(=120 kN) και συγκεκριμένα στα 115,4 kN προϋδεάζει για την κακή μηχανική αντοχή τους. Οι άλλοι 2 μονωτήρες αστόχησαν σε δυνάμεις μεγαλύτερες του SML κατά 6,9 % έως 8,9 % του SML, οι οποίες είναι αρκετά κοντά στο SML. Οι αστοχίες των μονωτήρων του κατασκευαστή C ήταν ξεγλιστρήματα των μεταλλικών ακροδεκτών, που είναι αποδεκτός τρόπος αστοχίας σύμφωνα με το υποκεφάλαιο 2.3.1. Τέλος, οι δύο μονωτήρες που πέρασαν επιτυχώς τη δοκιμή αστόχησαν σε δυνάμεις με μικρή απόκλιση μεταξύ τους.

Τέλος, στα σχήματα 3-107 και 3-110 και στον πίνακα 3-35 φαίνονται τα αποτελέσματα των συνθετικών μονωτήρων του κατασκευαστή D. Από τα αποτελέσματα παρατηρούμε ότι όλοι οι μονωτήρες αστόχησαν σε δύναμη εφελκυσμού μεγαλύτερη από το SML (=120 kN) τους, η οποία κυμάνθηκε από 13,9 % έως 52,7 % του SML γεγονός που δείχνει ότι η μηχανική αντοχή τους ήταν σε αρκετά καλά επίπεδα. Επίσης, η αστοχία όλων τους ήταν ξεγλιστρήματα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη τους, που σύμφωνα με το υποκεφάλαιο 2.3.1 της παρούσης διατριβής αναφέρεται στους πιο αποδεκτούς τρόπους αστοχίας των συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης κατά τη δοκιμή εφελκυσμού. Το γεγονός ότι όλοι οι μονωτήρες εμφάνισαν ως αστοχία τους το ξεγλιστρήματα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη, πολύ πιθανόν σημαίνει ότι ο κατασκευαστής D τους έχει κατασκευάσει με τρόπο, ώστε η αστοχία να εμφανίζεται εκεί. Τέλος, από το σχήμα 3-110 παρατηρούμε ότι η αστοχία των περισσότερων μονωτήρων του κατασκευαστή D εμφάνισε αρκετά μικρή απόκλιση από τη μέση τιμή, γεγονός το οποίο σημαίνει καλή κατασκευαστική διαδικασία.

3.5.1.3 Εκδοχή Γ: Δοκιμή εφελκυσμού 96 ωρών

Στη συνέχεια, για περαιτέρω διερεύνηση της δοκιμής εφελκυσμού στους συνθετικούς μονωτήρες ανάρτησης, εκτελέστηκε η δοκιμή εφελκυσμού διάρκειας 96 ωρών που περιγράφεται στην §11.2.2 του IEC 61109 [183] και ακολούθως η δοκιμή εφελκυσμού που περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 3.5.1.2 της παρούσης διδακτορικής διατριβής (Εκδοχή Β), χωρίς όμως να πραγματοποιηθεί η δοκιμή του RTL (15 s). Αυτή η δεύτερη φάση δοκιμής (διαδικασία Εκδοχής Β) πραγματοποιήθηκε για να δούμε κατά πόσο θα επηρεαστούν τα αποτελέσματα της αν πρώτα πραγματοποιηθεί στους μονωτήρες η δοκιμή εφελκυσμού των 96 ωρών.

Πιο συγκεκριμένα, δοκιμάστηκαν 6 καινούριοι συνθετικοί μονωτήρες ανάρτησης του κατασκευαστή Α και άλλοι 6 του κατασκευαστή D (το IEC 61109 [183] στην §11.2.2 ζητάει 4 μονωτήρες για τη δοκιμή των 96 ωρών). Δε δοκιμάστηκαν μονωτήρες από άλλον κατασκευαστή καθώς είχαν χρησιμοποιηθεί για τις άλλες δοκιμές. Οι μονωτήρες που

δοκιμάστηκαν φαίνονται τοποθετημένοι στη μηχανή εφελκυσμού στα σχήματα 3-111 (α) και (β). Η δύναμη που τους ασκήθηκε ήταν στο 70% του SML τους (δηλ. $70\% \times 120 \text{ kN} = 84 \text{ kN}$) για 96 ώρες και έπειτα, (όσοι πέρασαν με επιτυχία τη δοκιμή) με προσαρμοσμένη τη μεταλλική κατασκευή στους μεταλλικούς ακροδέκτες τους (όπως στην εκδοχή Β), η δύναμη αυξήθηκε γρήγορα αλλά ομαλά μέχρι την αστοχία του κάθε μονωτήρα και η δύναμη αυτή καταγράφηκε. Κριτήριο για την επιτυχία της πρώτης φάσης της δοκιμής (εφελκυσμός 96 ωρών στα 84 kN) ήταν να μη συμβεί αστοχία στους μονωτήρες (να μη συμβεί σπάσιμο της ράβδου ή ολοκληρωτικό ξεγλίστρημα της από τους μεταλλικούς ακροδέκτες ή σπάσιμο των μεταλλικών ακροδεκτών). Κριτήριο για την επιτυχία της δεύτερης φάσης της δοκιμής (εφελκυσμός, όπως στην Εκδοχή Β, χωρίς τη δοκιμή του RTL (60 kN για 15 s)) ήταν οι μονωτήρες να αντέξουν το SML τους (120 kN) για 30 s και έπειτα να αστοχήσουν σε δύναμη μεγαλύτερη του SML.



α

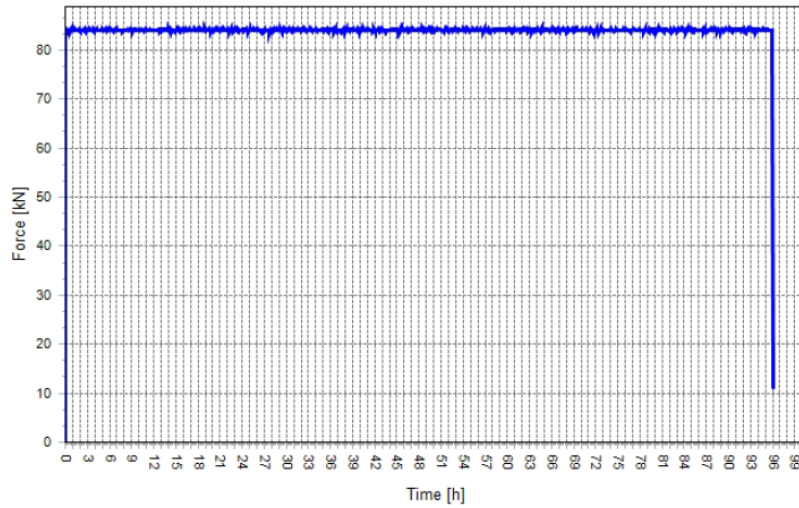


β

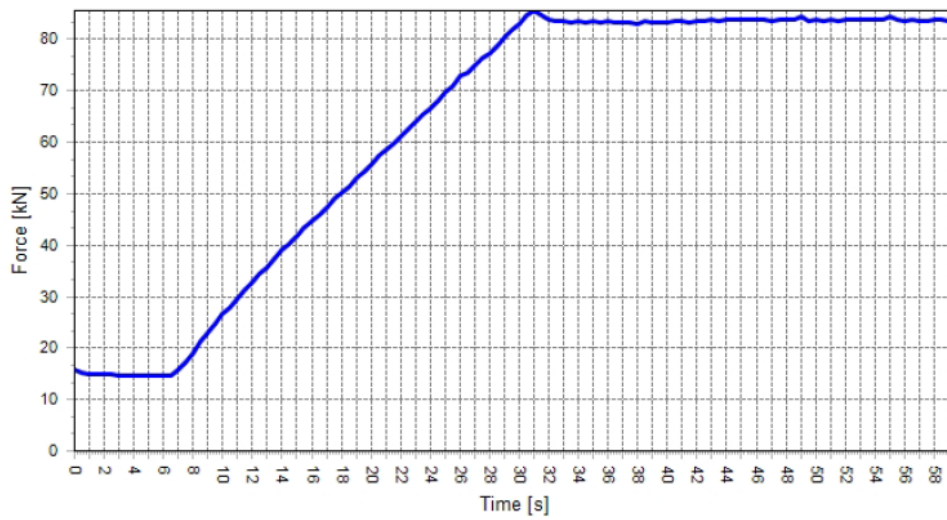
Σχήμα 3-111. Οι συνθετικοί μονωτήρες ανάρτησης τοποθετημένοι στη μηχανή εφελκυσμού για την πραγματοποίηση της δοκιμής 96 ωρών (κατασκευαστής A → κόκκινοι, κατασκευαστής D → γκρι). Λόγω περιορισμένου χώρου της μηχανής εφελκυσμού η δοκιμή πραγματοποιήθηκε δύο φορές (α) και (β).

Στο σχήμα 3-112 (α) φαίνεται η γραφική παράσταση της δύναμης εφελκυσμού (σε kN) που ασκήθηκε στους μονωτήρες συναρτήσει του χρόνου (σε ώρες). Στα σχήματα 3-112 (β) και (γ) φαίνονται τα στιγμιότυπα της δύναμης εφελκυσμού συναρτήσει του χρόνου κατά την εκκίνηση και κατά τη λήξη της δοκιμής των 96 ωρών.

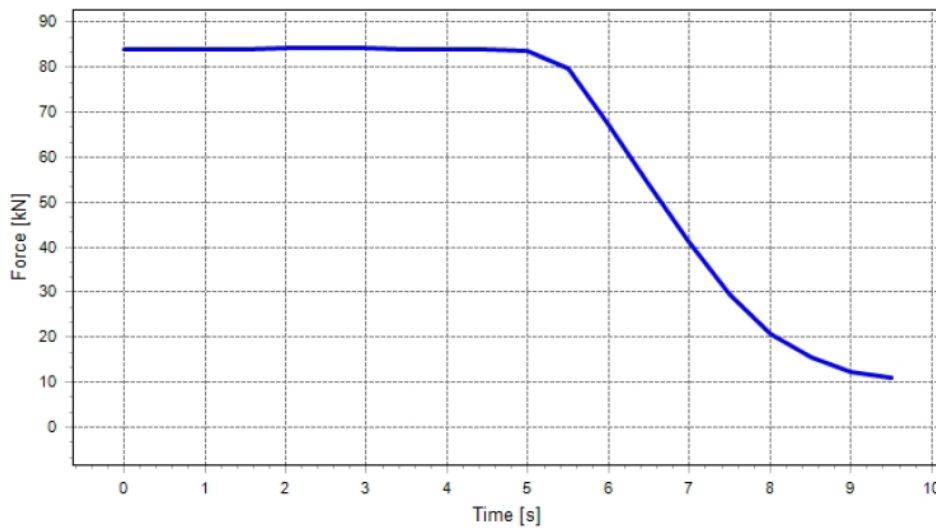
Στα σχήματα 3-113 (α) και (β) φαίνονται τα γραφήματα της δύναμης εφελκυσμού συναρτήσει του χρόνου για 1 εκ των 6 μονωτήρων του κατασκευαστή A και για 1 εκ των 6 μονωτήρων του κατασκευαστή D αντίστοιχα κατά τη δεύτερη φάση της δοκιμής (διαδικασία Εκδοχής Β). Τα γραφήματα των υπόλοιπων μονωτήρων είχαν παρόμοια μορφή.



α

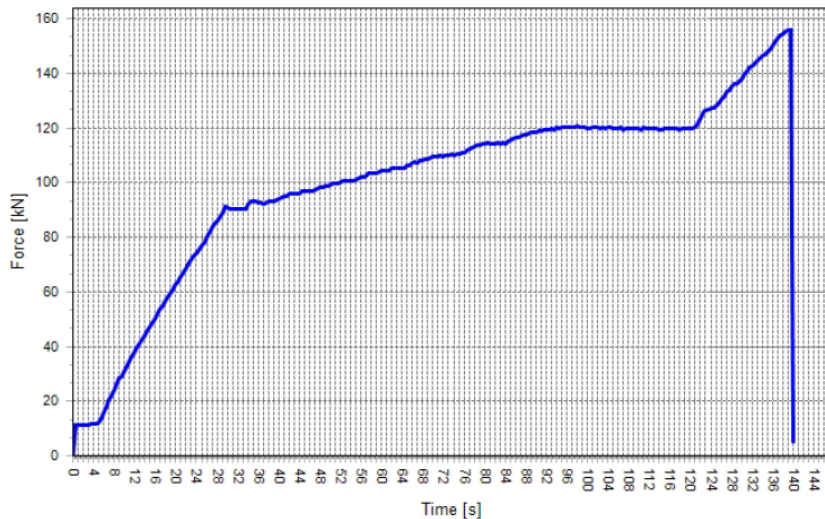


β

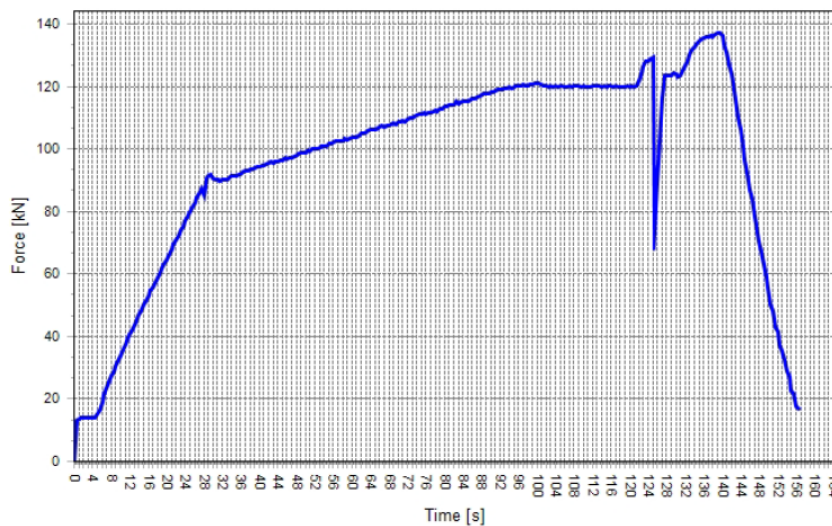


γ

Σχήμα 3-112. Γραφήματα της δύναμης εφελκυσμού που ασκήθηκε στους μονωτήρες συναρτήσει του χρόνου για: α) τη συνολική διάρκεια της δοκιμής 96 ωρών, β) την εκκίνηση της δοκιμής και γ) τη λήξη της δοκιμής.



α



β

Σχήμα 3-113. Γραφήματα της δύναμης εφελκυσμού συναρτήσει του χρόνου που ασκήθηκε στους μονωτήρες: α) A29 και β) D29 κατά τη δεύτερη φάση της δοκιμής (διαδικασία Εκδοχής B, χωρίς τη δοκιμή του RTL) Τα γραφήματα των υπόλοιπων 5 μονωτήρων του κατασκευαστή A και των υπόλοιπων 5 μονωτήρων του κατασκευαστή D είχαν παρόμοια μορφή με τα (α) και (β) αντίστοιχα.

Στους πίνακες 3-36 και 3-37 φαίνονται τα συνολικά αποτελέσματα της δοκιμής εφελκυσμού με τη διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω. Παρατηρείται ότι όλοι οι μονωτήρες πέρασαν με επιτυχία τη δοκιμή των 96 ωρών σε φορτίο 70% του SML, γεγονός που υποδηλώνει την καλή ποιότητα κατασκευής τους. Επίσης, στον πίνακα 3-36 φαίνεται ότι η τελική αστοχία των μονωτήρων του κατασκευαστή A συνέβη σε δυνάμεις εφελκυσμού μεγαλύτερες από το SML κατά 30,5% έως 47% και το είδος της αστοχίας τους ήταν ξεγλιστρήματα είτε του πάνω, είτε του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη τους. Παρόμοια, στον πίνακα 3-37 φαίνεται ότι και οι μονωτήρες του κατασκευαστή D πέρασαν όλοι τη δοκιμή των 96 ωρών και η αποτυχία τους συνέβη σε φορτία μεγαλύτερα του SML κατά 9,5% έως 38,1%. Σε αυτή την περίπτωση, όπως και στην Εκδοχή B, στους μονωτήρες του κατασκευαστή D αστόχησαν οι κάτω μεταλλικοί ακροδέκτες, γεγονός που ενισχύει την

υπόθεση ότι αυτό οφείλεται στην κατασκευαστική διαδικασία που έχει επιλέξει ο κατασκευαστής D, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

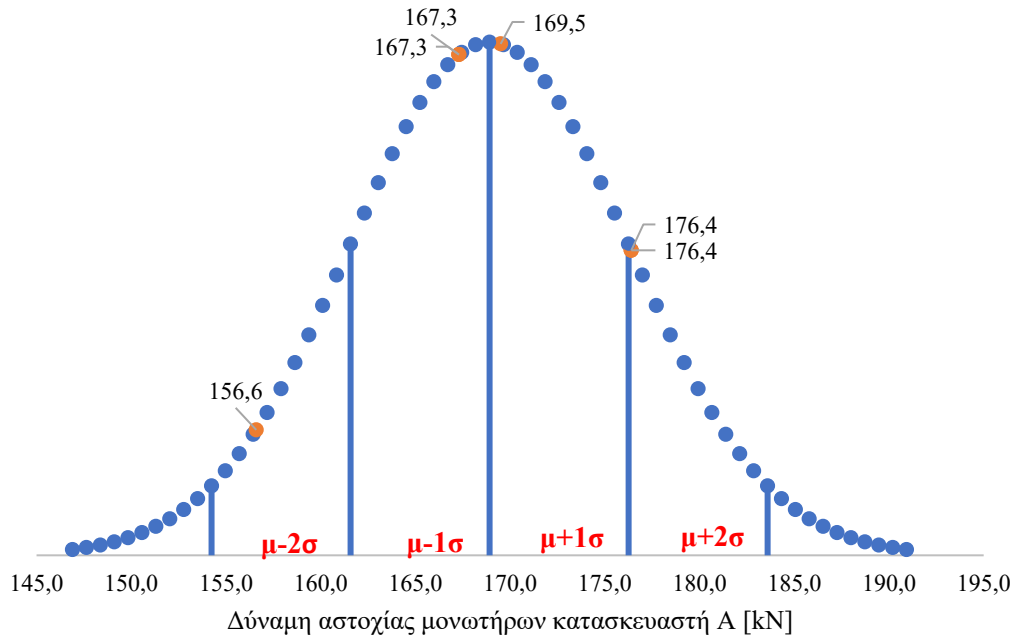
Πίνακας 3-36. Αποτελέσματα της δοκιμής εφελκυσμού (εκδοχή Γ) για τους συνθετικούς μονωτήρες ανάρτησης του κατασκευαστή A.

Μονωτήρας	70% x SML = 84 kN (96 h) (επιτυχία/αποτυχία)	SML (30 s) (επιτυχία/αποτυχία)	Αστοχία [kN]	Ποσοστό επί του SML (120 kN) [%]	Είδος αστοχίας
A28	επιτυχία	επιτυχία	176,4	147,0	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
A29	επιτυχία	επιτυχία	156,6	130,5	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
A210	επιτυχία	επιτυχία	167,3	139,4	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
A212	επιτυχία	επιτυχία	169,5	141,3	Ξεγλίστρημα του πάνω μεταλλικού ακροδέκτη
A238	επιτυχία	επιτυχία	167,3	139,4	Ξεγλίστρημα του πάνω μεταλλικού ακροδέκτη
A239	επιτυχία	επιτυχία	176,4	147,0	Ξεγλίστρημα του πάνω μεταλλικού ακροδέκτη
Μέσος όρος [kN]			168,9	140,8	
Τυπική απόκλιση [kN]			7,3	6,1	

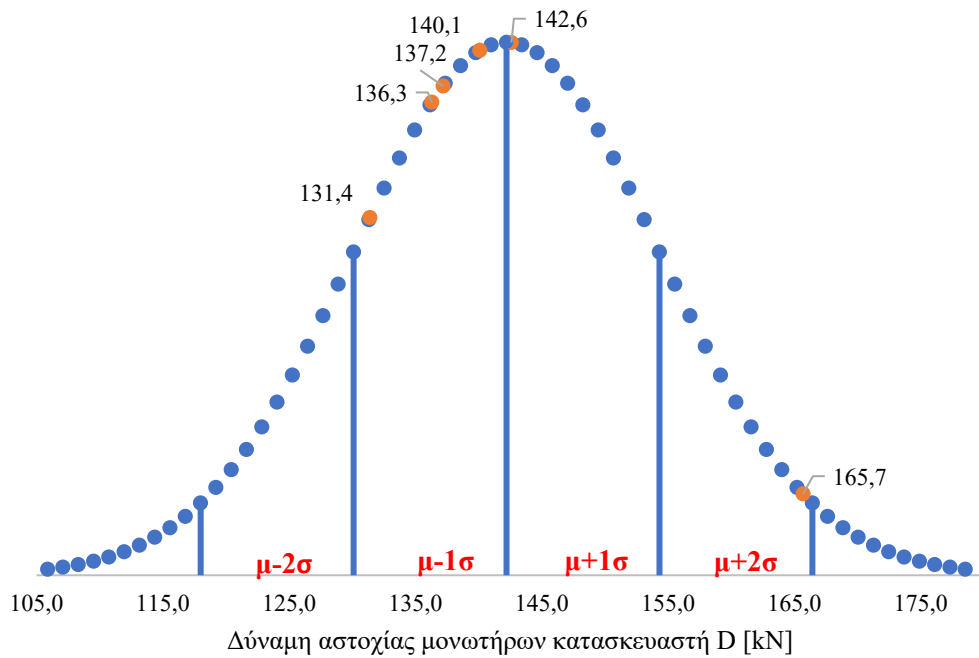
Πίνακας 3-37. Αποτελέσματα της δοκιμής εφελκυσμού (εκδοχή Γ) για τους συνθετικούς μονωτήρες ανάρτησης του κατασκευαστή D.

Μονωτήρας	70% x SML = 84 kN (96 h) (επιτυχία/αποτυχία)	SML (30s) (επιτυχία/αποτυχία)	Αστοχία [kN]	Ποσοστό επί του SML (120 kN) [%]	Είδος αστοχίας
D21	επιτυχία	επιτυχία	165,7	138,1	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
D23	επιτυχία	επιτυχία	131,4	109,5	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
D25	επιτυχία	επιτυχία	136,3	113,6	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
D26	επιτυχία	επιτυχία	142,6	118,8	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
D27	επιτυχία	επιτυχία	140,1	116,8	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
D29	επιτυχία	επιτυχία	137,2	114,3	Ξεγλίστρημα του κάτω μεταλλικού ακροδέκτη
Μέσος όρος [kN]			142,2	118,5	
Τυπική απόκλιση [kN]			12,1	10,1	

Στα σχήματα 3-114 και 3-115 φαίνονται οι κανονικές κατανομές των δυνάμεων εφελκυσμού στις οποίες αστόχησαν οι μονωτήρες του κατασκευαστή A και D αντίστοιχα. Παρατηρούμε, ότι εκτός από έναν μονωτήρα του κατασκευαστή A και έναν του D οι μονωτήρες αστοχούσαν σε αρκετά κοντινές δυνάμεις εφελκυσμού, που σημαίνει ότι η κατασκευαστική διαδικασία που ακολούθησαν οι κατασκευαστές τους ήταν καλή.



Σχήμα 3-114. Κανονική κατανομή για τις δυνάμεις αστοχίας των συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης του κατασκευαστή A κατά τη δοκιμή εφελκυσμού (εκδοχή Γ).



Σχήμα 3-115. Κανονική κατανομή για τις δυνάμεις αστοχίας των συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης του κατασκευαστή D κατά τη δοκιμή εφελκυσμού (εκδοχή Γ).

3.5.1.4 Συγκρίσεις μεταξύ των διαφορετικών εκδοχών της δοκιμής εφελκυσμού

Συνοψίζοντας τα συμπεράσματα των δοκιμών εφελκυσμού των Εκδοχών A, B και Γ και συγκρίνοντας τα μεταξύ τους καταλήγουμε στα παρακάτω:

- Η δοκιμή εφελκυσμού της Εκδοχής Α έχει μικρή διάρκεια (περίπου 3 λεπτά για κάθε μονωτήρα) και δίνει σημαντικές πληροφορίες για τη μηχανική αντοχή των μονωτήρων ανάρτησης ελέγχοντας και την αντοχή των μεταλλικών ακροδεκτών τους. Επομένως, προτείνεται αυτή η δοκιμή να εκτελείται σε 10 μονωτήρες από κάθε παρτίδα κατασκευής (στο εργοστάσιο) ή παραλαβής (κατά τις δοκιμές παραλαβής παρτίδας).
- Η δοκιμή εφελκυσμού της Εκδοχής Γ περιλαμβάνει τη διαδικασία της Εκδοχής Β προσθέτοντας σε αυτή και τη δοκιμή εφελκυσμού των 96 ωρών σε δύναμη 70% του SML των μονωτήρων. Η δοκιμή με τη διαδικασία της Εκδοχής Β διαρκεί περίπου 3 λεπτά, ενώ η δοκιμή με τη διαδικασία της Εκδοχής Γ διαρκεί 96 ώρες (= 4 ημέρες). Παρατηρώντας τον πίνακα 3-33 βλέπουμε ότι οι μονωτήρες του κατασκευαστή Α (κατά τη δοκιμή της Εκδοχής Β) αστόχησαν σε δύναμη εφελκυσμού κατά μέσο όρο 51% μεγαλύτερη από το SML (SML = 120 kN) με μια τυπική απόκλιση 6,1%, ενώ τα αντίστοιχα νούμερα κατά τη δοκιμή της Εκδοχής Γ ήταν 40,8% και 6,1% (από τον πίνακα 3-36). Από τα παραπάνω προκύπτει ότι όταν οι μονωτήρες του κατασκευαστή Α καταπονήθηκαν από φορτίο εφελκυσμού (70% του SML) για 96 ώρες στη συνέχεια αστόχησαν σε δυνάμεις μικρότερες κατά 10% του SML (δηλ. 10% x 120 kN = 12 kN) σε σχέση με την Εκδοχή Β. Ομοίως, τα αντίστοιχα νούμερα για τους μονωτήρες του κατασκευαστή D ήταν 27,9% και 13,2% (από τον πίνακα 3-35, Εκδοχή Β) και 18,5% και 10,1% (από τον πίνακα 3-37, Εκδοχή Γ). Επομένως, παρατηρείται και στην περίπτωση του κατασκευαστή D ότι οι δυνάμεις αστοχίας κατά τη δοκιμή της Εκδοχής Γ είναι μικρότερες από αυτές της εκδοχής Β περίπου κατά 10% του SML (δηλ. 10% x 120 kN = 12 kN).

Συνεπώς, βάσει των παραπάνω προτείνεται να εκτελούνται η δοκιμή εφελκυσμού της Εκδοχής Α (προτείνεται σε 10 μονωτήρες) και η δοκιμή εφελκυσμού της Εκδοχής Β (προτείνεται σε άλλους 10 μονωτήρες), λόγω της μεγάλης εξοικονόμησης χρόνου που αυτές παρέχουν. Στη συνέχεια, εάν ισχύει:

- (δύναμη αστοχίας τουλάχιστον ενός μονωτήρα στις δοκιμές Εκδοχής Α και Β) \leq (του SML των μονωτήρων), τότε θεωρούμε ότι οι μονωτήρες απέτυχαν στη δοκιμή και απορρίπτονται χωρίς να χρειάζεται να εκτελεστεί η πολύωρη διαδικασία της Εκδοχής Γ.

- $SML < (\text{δύναμη αστοχίας τουλάχιστον ενός μονωτήρα στις δοκιμές Εκδοχής A και B}) \leq (110\% \text{ του SML})$, τότε δε μπορούμε να αποφανθούμε και θα πρέπει να εκτελεστεί η διαδικασία της Εκδοχής Γ.
- $(\text{δύναμη αστοχίας όλων των μονωτήρων στις δοκιμές Εκδοχής A και B}) > (110\% \text{ του SML})$, τότε το αποτέλεσμα της δοκιμής είναι επιτυχές και δε χρειάζεται να εκτελεστεί καθόλου η πολύωρη διαδικασία της Εκδοχής Γ.

3.5.2 Διερεύνηση της αντοχής των συνθετικών μονωτήρων στήριξης σε φορτίο κάμψης

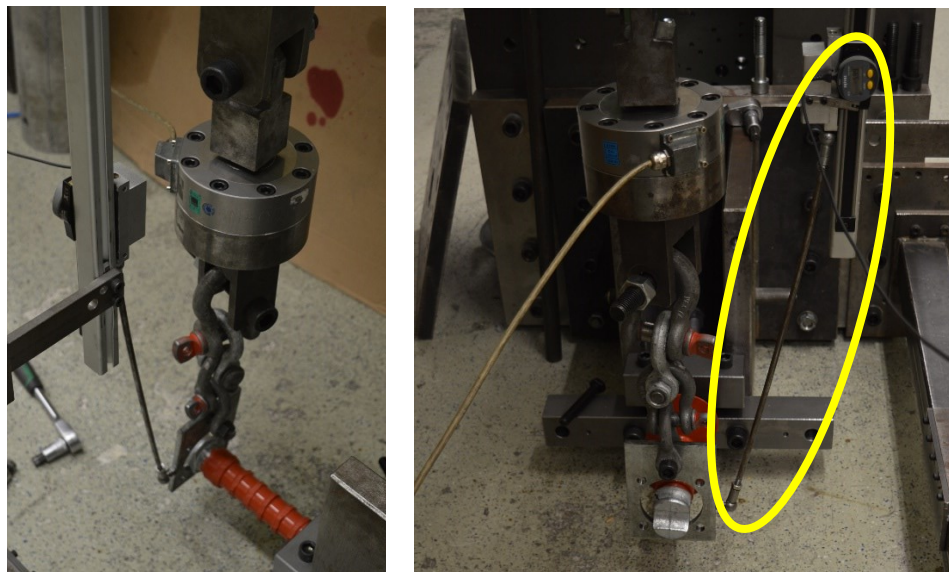
Στους καινούριους συνθετικούς μονωτήρες στήριξης των κατασκευαστών A, C και D έγιναν δοκιμές με φορτίο κάμψης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν 27, 3 και 14 μονωτήρες στήριξης από τους κατασκευαστές A, C και D αντίστοιχα. Δεν δοκιμάστηκαν μονωτήρες από τους κατασκευαστές B, E και F καθώς οι μονωτήρες αυτοί δεν επαρκούσαν σε αριθμό. Η δοκιμή σε φορτίο κάμψης που πραγματοποιήθηκε εν μέρει περιλαμβάνεται στο πρότυπο IEC 61952 [193] και εν μέρει έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία σαν έρευνα (υποκεφάλαιο 2.3.2).

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη συγκεκριμένη δοκιμή έχει ως εξής: αρχικά ο μονωτήρας στήριξης προσαρμοζόταν στη διάταξη, όπως φαίνεται στο σχήμα 3-116. Στη συνέχεια, προσαρμοζόταν στη διάταξη ο βραχίονας για τη μέτρηση της μετατόπισης (deflection) του άκρου του μονωτήρα, στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική του θέση (σε κίτρινο κύκλο στο σχήμα 3-116), καθώς επίσης τοποθετούταν και ο αισθητήρας ανίχνευσης ακουστικών εκπομπών επάνω στον πακτωμένο μεταλλικό ακροδέκτη (κάτω μεταλλικός ακροδέκτης) του μονωτήρα για την ανίχνευση του σπασίματος των γυάλινων ινών της ράβδου του μονωτήρα (σχήμα 3-117).

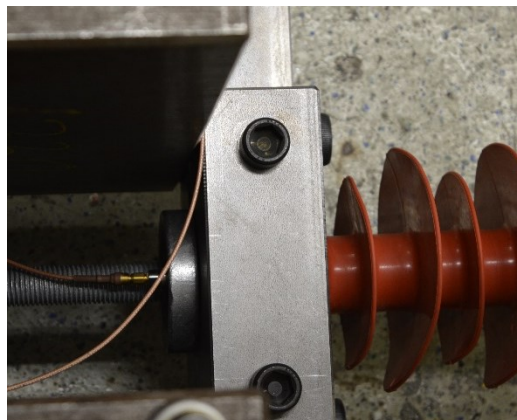
Στη συνέχεια από το λογισμικό ρυθμίζαμε, ώστε το φορτίο κάμψης (στη συγκεκριμένη διάταξη ήταν: φορτίο εφελκυσμού) να αυξάνεται γρήγορα αλλά ομαλά, ενώ παράλληλα καταγράφαμε τη μετατόπιση και τις ακουστικές εκπομπές, μέχρις ότου ο μονωτήρας να οδηγηθεί σε αστοχία.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής φαίνονται στα σχήματα E-1 έως E-44 του Παραρτήματος E. Ουσιαστικά, πρόκειται για διαγράμματα που απεικονίζουν τη δύναμη κάμψης (σε kN) και την ακουστική εκπομπή συναρτήσει της μετατόπισης του πάνω

μεταλλικού ακροδέκτη (ο ακροδέκτης στον οποίο ασκούταν η δύναμη) από την αρχική θέση ηρεμίας του. Επίσης, στα διαγράμματα αυτά έχουν προστεθεί οι γραμμικές προεκτάσεις των καμπυλών της δύναμης κάμψης (στην περιοχή που υπάρχει ελαστική συμπεριφορά του μονωτήρα). Το σημείο στο οποίο η καμπύλη της δύναμης κάμψης αρχίζει να παρεκκλίνει από τη γραμμική προέκταση (φαίνεται με κόκκινη βούλα στα διαγράμματα E-1 έως E-44), δηλαδή το σημείο από το οποίο και έπειτα ο μονωτήρας σταματά να εμφανίζει ελαστική συμπεριφορά και εμφανίζει πλαστική συμπεριφορά (από εκεί και πέρα ο μονωτήρας αποκτά μόνιμη παραμόρφωση - σχήμα 2-50, υποκεφάλαιο 2.3.2), ταυτίζεται με την παράμετρο MDCL (σχήμα 2-51, υποκεφάλαιο 2.3.2).



Σχήμα 3-116. Διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή της δοκιμής κάμψης στους συνθετικούς μονωτήρες στήριξης του κατασκευαστή Α. Μέσα στον κίτρινο κύκλο φαίνεται η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της μετατόπισης (deflection) κατά την κάμψη.



Σχήμα 3-117. Αισθητήρας ανίχνευσης ακουστικών εκπομπών κατά τη διάρκεια της δοκιμής κάμψης.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η πληροφορία των σχημάτων E-1 έως E-44 συγκεντρώνεται στους πίνακες 3-38, 3-39 και 3-40 για τους μονωτήρες των κατασκευαστών Α, C και D

αντίστοιχα. Στους πίνακες αυτούς αναγράφονται οι τιμές της παραμέτρου MDCL και SCL, όπως αυτές βρέθηκαν από τις τεχνικές προδιαγραφές των κατασκευαστών των συγκεκριμένων μονωτήρων (φαίνονται με πράσινο χρώμα). Επίσης, στην 4^η στήλη των πινάκων αναγράφεται η δύναμη στην οποία η ακουστική εκπομπή ξεπέρασε για 1^η φορά το 1,5 dB.

Πίνακας 3-38. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των σχημάτων E-1 έως E-27 για τη δοκιμή κάμψης στους μονωτήρες στήριξης του κατασκευαστή Α.

Μονωτήρας	MDCL (προδιαγραφής) [kN]	MDCL (δοκιμής) [kN]	Δύναμη που αντιστοιχεί η 1η ακουστική εκπομπή [kN]	CFL (δοκιμής) [kN]	SCL (11 kN)
A11	5,50	5,97	10,26	13,82	επιτυχία
A12		7,46	10,62	12,39	επιτυχία
A13		5,89	10,92	13,15	επιτυχία
A111		6,75	14,53	15,95	επιτυχία
A114		6,12	12,72	15,22	επιτυχία
A115		6,28	13,85	14,78	επιτυχία
A116		5,86	12,93	14,33	επιτυχία
A117		6,01	12,23	16,11	επιτυχία
A118		6,89	12,33	14,08	επιτυχία
A119		5,29	9,78	13,29	επιτυχία
A120		7,20	11,10	16,04	επιτυχία
A121		9,05	10,90	14,78	επιτυχία
A122		5,41	11,85	14,33	επιτυχία
A123		7,46	11,60	15,66	επιτυχία
A124		5,92	11,12	12,75	επιτυχία
A125		5,92	11,00	14,33	επιτυχία
A126		5,38	11,60	14,69	επιτυχία
A127		6,81	12,90	15,89	επιτυχία
A128		7,74	13,80	15,44	επιτυχία
A129		7,05	12,30	15,03	επιτυχία
A130	7,43	10,36	16,14	επιτυχία	
A131	7,11	-	14,14	επιτυχία	
A132	3,98	8,82	16,20	επιτυχία	
A134	8,86	14,11	15,86	επιτυχία	
A135	6,98	14,30	14,87	επιτυχία	
A136	8,86	13,03	15,47	επιτυχία	
A137	6,66	13,06	14,75	επιτυχία	
Μέσος όρος [kN]	-	6,68	12,00	14,80	-
Τυπική απόκλιση [kN]	-	1,16	1,49	1,08	-

Πίνακας 3-39. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των σχημάτων E-28 έως E-30 για τη δοκιμή κάμψης στους μονωτήρες στήριξης του κατασκευαστή C.

Μονωτήρας	MDCL (προδιαγραφής) [kN]	MDCL (δοκιμής) [kN]	Δύναμη που αντιστοιχεί η 1η ακουστική εκπομπή [kN]	CFL (δοκιμής) [kN]	SCL (12 kN)
C16	6,00	6,89	12,93	15,50	επιτυχία
C17		6,78	13,54	16,74	επιτυχία
C18		7,46	13,03	16,33	επιτυχία
Μέσος όρος [kN]	-	7,04	13,17	16,19	-
Τυπική απόκλιση [kN]	-	0,37	0,33	0,63	-

Πίνακας 3-40. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των σχημάτων E-31 έως E-44 για τη δοκιμή κάμψης στους μονωτήρες στήριξης του κατασκευαστή D.

Μονωτήρας	MDCL (προδιαγραφής) [kN]	MDCL (δοκιμής) [kN]	Δύναμη που αντιστοιχεί η 1η ακουστική εκπομπή [kN]	CFL (δοκιμής) [kN]	SCL (12,5 kN)
D17	6,00	6,69	17,47	24,37	επιτυχία
D18		7,90	19,21	23,29	επιτυχία
D19		6,25	17,82	22,75	επιτυχία
D110		6,00	17,99	24,00	επιτυχία
D111		6,28	18,11	23,33	επιτυχία
D112		6,28	18,51	23,96	επιτυχία
D113		7,02	17,41	23,51	επιτυχία
D114		7,80	16,84	22,41	επιτυχία
D115		5,92	18,02	22,90	επιτυχία
D116		6,25	18,23	23,67	επιτυχία
D117		6,28	17,09	23,33	επιτυχία
D118		5,58	18,10	23,36	επιτυχία
D119		6,25	18,02	23,29	επιτυχία
D120		6,25	18,80	22,90	επιτυχία
Μέσος όρος [kN]		-	6,48	17,97	23,36
Τυπική απόκλιση [kN]	-	0,67	0,64	0,53	-

Από τα αποτελέσματα των πινάκων 3-38 έως και 3-40 μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα – παρατηρήσεις:

- ✓ Σε συμφωνία και με την πηγή [29], μέσω αυτής της δοκιμής, η οποία διαρκεί για τον κάθε μονωτήρα περίπου 3 min, μπορεί πολύ γρήγορα να επαληθευτεί η τιμή της παραμέτρου MDCL των συνθετικών μονωτήρων στήριξης. Παρατηρώντας

τους πίνακες 3-38 έως 3-40 οι τιμές του MDCL με αυτή τη διαδικασία προέκυψαν ίσες ή ελαφρώς μεγαλύτερες από τις τιμές του MDCL των προδιαγραφών των κατασκευαστών. Μόνο 4 μονωτήρες του κατασκευαστή A και 2 του κατασκευαστή D είχαν τιμές ελαφρώς μικρότερες της προδιαγραφής του κατασκευαστή. Η αντίστοιχη δοκιμή του Προτύπου IEC 61952, §10.4.1 [193] για την επαλήθευση του MDCL των συνθετικών μονωτήρων στήριξης έχει διάρκεια 96 ώρες. Επομένως, σε περιπτώσεις όπου απαιτείται εξοικονόμηση χρόνου και ταχύτητα (π.χ. στις δοκιμές παραλαβής παρτίδας συνθετικών μονωτήρων), προτείνεται να εφαρμόζεται η διαδικασία εύρεσης του MDCL που προτάθηκε από την πηγή [29] και επαληθεύτηκε από τη συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή.

- ✓ Παρατηρούμε, επίσης, ότι μέσω αυτής της διαδικασίας μπορεί να επαληθευτεί και εάν οι μονωτήρες αντέχουν το SCL της προδιαγραφής τους. Ουσιαστικά θα πρέπει η τιμή του CFL να προκύψει μεγαλύτερη από την τιμή της προδιαγραφής για το SCL. Σε όλους τους μονωτήρες που δοκιμάστηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή το παραπάνω ισχύει.
- ✓ Επιπλέον, η τιμή της δύναμης η οποία αντιστοιχεί στην 1^η φορά που εμφανίζεται ακουστική εκπομπή μεγαλύτερη του 1,5 dB φαίνεται να είναι αρκετά κοντά στην τιμή του SCL της προδιαγραφής των μονωτήρων (για τους μονωτήρες A και C, δεν ισχύει για τον μονωτήρα D, όπου η ακουστική εκπομπή εμφανίστηκε σε αρκετά μεγαλύτερες δυνάμεις από το SCL). Για τον μονωτήρα D και για παρόμοιες περιπτώσεις, αν η δύναμη, που αντιστοιχεί στην 1^η ακουστική εκπομπή, εμφανίζει τιμές μεγαλύτερες του SCL, τότε μπορούμε να πούμε ότι το SCL της προδιαγραφής των μονωτήρων επαληθεύεται και με δεύτερο τρόπο, καθώς η αντοχή αυτών των μονωτήρων ξεπερνά το SCL τους.
- ✓ Επίσης, μέσω της δοκιμής αυτής καταγράφεται και η μέγιστη δύναμη στην οποία συμβαίνει αστοχία του μονωτήρα (CFL).
- ✓ Με μια πιο αναλυτική παρατήρηση των αποτελεσμάτων των πινάκων 3-38 έως 3-40 έχουμε τα παρακάτω:

Για τους μονωτήρες του κατασκευαστή A (πίνακας 3-38)

- Το MDCL έλαβε τιμές από 36,18% έως 82,27% του SCL και αν εξαιρέσουμε τις κοκκινισμένες τιμές, στις οποίες το MDCL ήταν μικρότερο της προδιαγραφής, τότε το MDCL κυμάνθηκε από 53,27% έως 82,27% του SCL ($MDCL \approx \{53\% - 82\% \} \times SCL$).

- Το CFL κυμάνθηκε μεταξύ 112,64% και 146,73% του SCL ($CFL \approx \{113 \% - 147 \% \} \times SCL$).

Για τους μονωτήρες του κατασκευαστή C (πίνακας 3-39)

- Το MDCL έλαβε τιμές από 56,50% έως 62,17% του SCL ($MDCL \approx \{57 \% - 62 \% \} \times SCL$).
- Το CFL κυμάνθηκε μεταξύ 129,17% και 139,5% του SCL ($CFL \approx \{129 \% - 140 \% \} \times SCL$).

Για τους μονωτήρες του κατασκευαστή D (πίνακας 3-40)

- Το MDCL έλαβε τιμές από 44,64% έως 63,20% του SCL και αν εξαιρέσουμε τις κοκκινισμένες τιμές, στις οποίες το MDCL ήταν μικρότερο της προδιαγραφής, τότε το MDCL κυμάνθηκε από 48,00% έως 63,20% του SCL ($MDCL \approx \{48 \% - 63 \% \} \times SCL$).
- Το CFL κυμάνθηκε μεταξύ 183,20% και 194,96% του SCL ($CFL \approx \{183 \% - 195 \% \} \times SCL$).

3.6 Επιταχυνόμενη γήρανση συνθετικών μονωτήρων

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διατριβής πραγματοποιήθηκαν δοκιμές στο υλικό (HTV silicone rubber με προσμίξεις ATH) του μονωτικού περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων έπειτα από δύο διαδικασίες επιταχυνόμενης γήρανσης. Οι μέθοδοι επιταχυνόμενης γήρανσης που εκτελέστηκαν ήταν οι εξής:

A) Γήρανση με βρασμό μέσα σε διάλυμα απιονισμένου νερού με 0,1% κατά βάρος χλωριούχο νάτριο (NaCl).

B) Γήρανση με θέρμανση σε φούρνο βιομηχανικού τύπου στους 150 °C.

Τα δοκίμια, τα οποία υποβλήθηκαν στις παραπάνω μεθόδους επιταχυνόμενης γήρανσης, φαίνονται στον πίνακα 3-41.

Πίνακας 3-41. Δοκίμια μονωτήρων που υποβλήθηκαν σε επιταχυνόμενη γήρανση.

Μονωτήρας	Γήρανση με βρασμό	Γήρανση με θέρμανση
A1	25 μισά κιάθια	25 μισά κιάθια
C1	25 μισά κιάθια	25 μισά κιάθια
D2	25 μισά κιάθια	25 μισά κιάθια
UA1	25 μισά κιάθια	25 μισά κιάθια
UB21-UB26	25 μισά κιάθια	25 μισά κιάθια

Όλα τα δοκίμια τοποθετήθηκαν ταυτόχρονα στη συσκευή βρασμού και στον φούρνο και αφαιρούνταν σε ομάδες των 5 μισών κυαθίων ανά διαστήματα ώστε να υποβληθούν σε δοκιμές – μετρήσεις. Τα χρονικά διαστήματα στα οποία τα δοκίμια (του κάθε τύπου και κατασκευαστή μονωτήρα) υποβάλλονταν σε δοκιμές – μετρήσεις φαίνονται στον πίνακα 3-42.

Πίνακας 3-42. Χρονικά διαστήματα στα οποία τα δοκίμια (κάθε τύπου και κατασκευαστή μονωτήρα) υποβάλλονταν σε δοκιμές μετρήσεις, έπειτα από καταπόνηση τους με τις δύο μεθόδους επιταχυνόμενης γήρανσης.

Δοκιμές - μετρήσεις έπειτα από	Γήρανση με βρασμό	Γήρανση με θέρμανση
0 μέρες	Οι μετρήσεις είχαν εκτελεστεί στο αντίστοιχο υποκεφάλαιο της διατριβής	Οι μετρήσεις είχαν εκτελεστεί στο αντίστοιχο υποκεφάλαιο της διατριβής
1 μέρα	5 μισά κυάθια	5 μισά κυάθια
2 μέρες	5 μισά κυάθια	5 μισά κυάθια
4 μέρες	5 μισά κυάθια	5 μισά κυάθια
8 μέρες	5 μισά κυάθια	5 μισά κυάθια
16 μέρες	5 μισά κυάθια	5 μισά κυάθια

3.6.1 Δοκιμές μετά από γήρανση με βρασμό

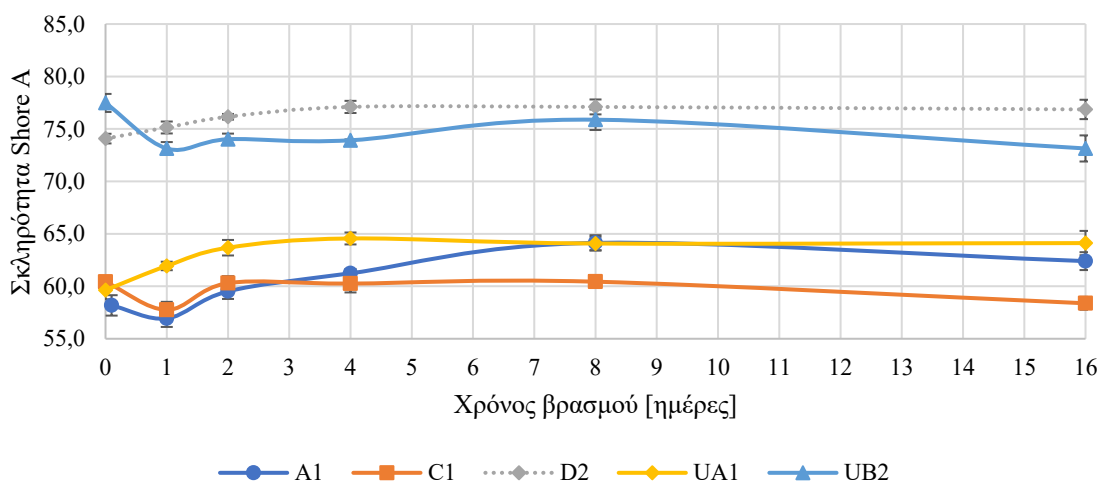
Η επιταχυνόμενη γήρανση με βρασμό πραγματοποιήθηκε μέσω βρασμού των δοκιμίων, σε κατάλληλο δοχείο (από ανοξείδωτο ατσάλι), μέσα σε διάλυμα απιονισμένου νερού με 0,1% κατά βάρος χλωριούχο νάτριο (NaCl). Η παρασκευή του διαλύματος περιγράφεται στο Πρότυπο IEC 62217 [151]. Η συσκευή (βραστήρας) που χρησιμοποιήθηκε για το βρασμό, καθώς και τα δοκίμια μέσα της φαίνονται στο σχήμα 3-118.



Σχήμα 3-118. Συσκευή βρασμού που χρησιμοποιήθηκε για την επιταχυνόμενη γήρανση των δοκιμίων και κυπελάκια με τα δοκίμια των μονωτήρων (1 ημέρας, 2 ημερών, 4 ημερών, 8 ημερών και 16 ημερών).

Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν μετά την αφαίρεση των δοκιμίων από τη συσκευή βρασμού, σύμφωνα με τα χρονικά διαστήματα του πίνακα 3-42, ήταν η μέτρηση της σκληρότητας Shore A (α) σε ένα μισό κυάθιο και β) σε δύο μισά κυάθια, με τις διαδικασίες που περιγράφονται στο υποκεφάλαιο 3.4.1.2.1 της παρούσης διατριβής) και η μέτρηση της πυκνότητας (με τη διαδικασία που έχει περιγραφεί στο υποκεφάλαιο 3.4.1.3). Επιλέχθηκαν αυτές οι δύο δοκιμές λόγω των σημαντικών αποτελεσμάτων που προκύπτουν σε σχέση με τον χρόνο που απαιτείται για την εκτέλεση τους. Δεν κατέστη εφικτό να πραγματοποιηθούν περισσότερες δοκιμές λόγω έλλειψης δοκιμίων. Οι δοκιμές πραγματοποιούνταν μέσα σε διάστημα 3 ωρών μετά την αφαίρεση των δοκιμίων από τη συσκευή βρασμού.

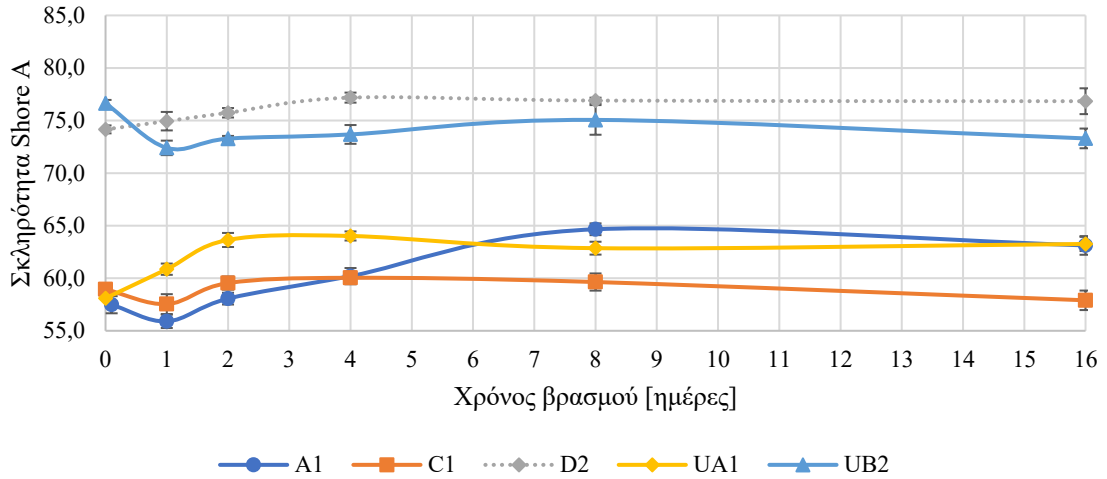
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της σκληρότητας Shore A σε ένα μισό κυάθιο φαίνονται στο σχήμα 3-119 και σε δύο μισά κυάθια, τοποθετημένα το ένα επάνω στο άλλο, στο σχήμα 3-120.



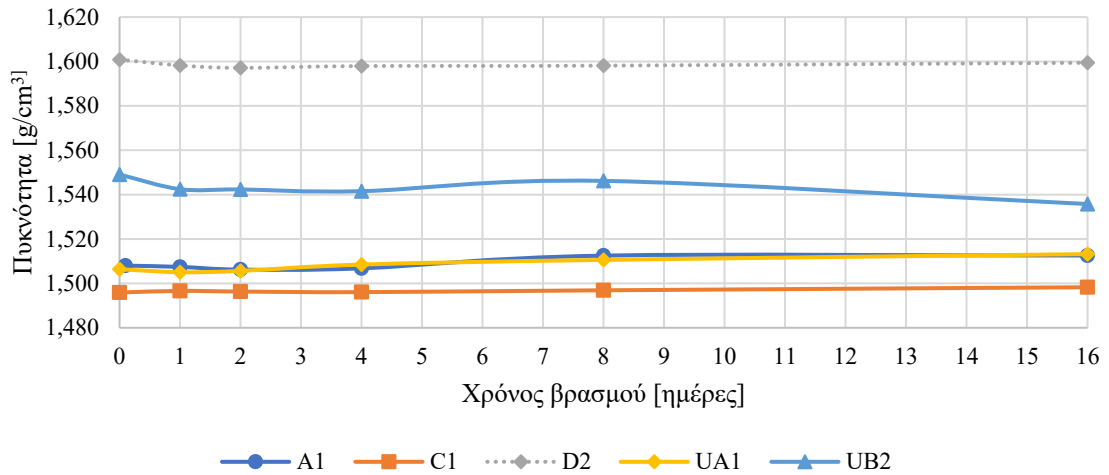
Σχήμα 3-119. Μετρήσεις της σκληρότητας Shore A σε ένα μισό κυάθιο των εξεταζόμενων μονωτήρων έπειτα από επιταχυνόμενη γήρανση με βρασμό.

Παρατηρώντας τα σχήματα 3-119 και 3-120 βλέπουμε ότι οι μετρήσεις δε μεταβλήθηκαν ιδιαίτερα όταν μετρήσαμε σε δύο μισά κυάθια (σχήμα 3-120), αντί για ένα μισό κυάθιο (σχήμα 3-119). Επίσης, παρατηρούμε μια ελαφριά αύξηση της σκληρότητας Shore A, καθώς αυξάνονται οι μέρες της καταπόνησης των δοκιμίων στον βρασμό χωρίς όμως αυτή η αύξηση να είναι σημαντική. Ενδεχομένως, για να ληφθούν πιο ασφαλή συμπεράσματα, να χρειάζονται παραπάνω μέρες καταπόνησης των δοκιμίων με τη μέθοδο του βρασμού.

Στο σχήμα 3-121 φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της πυκνότητας.



Σχήμα 3-120. Μετρήσεις της σκληρότητας Shore A σε δύο μισά κύαθια (τοποθετημένα το ένα επάνω στο άλλο) των εξεταζόμενων μονωτήρων έπειτα από επιταχυνόμενη γήρανση με βρασμό.



Σχήμα 3-121. Μετρήσεις της πυκνότητας των εξεταζόμενων μονωτήρων έπειτα από επιταχυνόμενη γήρανση με βρασμό.

Από το σχήμα 3-121 παρατηρούμε ότι η πυκνότητα του υλικού των μονωτήρων παραμένει αμετάβλητη καθώς αυξάνονται οι ημέρες καταπόνησης των δοκιμίων σε βρασμό. Ίσως, και σε αυτήν την περίπτωση να υπάρξουν διαφορετικά συμπεράσματα, εάν οι ημέρες βρασμού αυξηθούν κατά πολύ, ώστε να επέλθει αισθητή γήρανση στο υλικό των συνθετικών μονωτήρων.

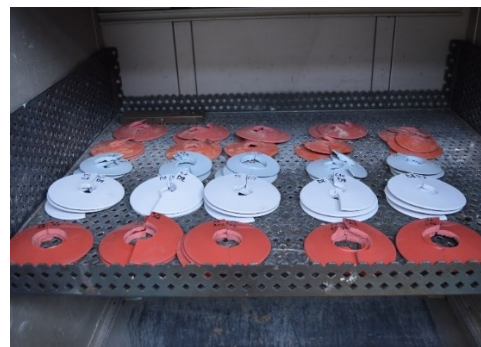
3.6.2 Δοκιμές μετά από γήρανση με θέρμανση σε βιομηχανικό φούρνο

Η επιταχυνόμενη γήρανση των συνθετικών μονωτήρων με θέρμανση πραγματοποιήθηκε τοποθετώντας τα δοκίμια μέσα σε βιομηχανικό φούρνο και θερμαίνοντας τα σε σταθερή θερμοκρασία 150 °C. Ο βιομηχανικός φούρνος, καθώς και τα δοκίμια των μονωτήρων που τοποθετήθηκαν μέσα σε αυτόν, φαίνονται στο σχήμα 3-122 (α) και (β) αντίστοιχα.

Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν μετά την αφαίρεση των δοκιμίων από τον βιομηχανικό φούρνο, σύμφωνα με τα χρονικά διαστήματα του πίνακα 3-42, ήταν (όπως και στο υποκεφάλαιο 3.6.1) η μέτρηση της σκληρότητας Shore A (α) σε ένα μισό κυάθιο και β) σε δύο μισά κυάθια, με τις διαδικασίες που περιγράφονται στο υποκεφάλαιο 3.4.1.2.1 της παρούσης διατριβής) και η μέτρηση της πυκνότητας (με τη διαδικασία που έχει περιγραφεί στο υποκεφάλαιο 3.4.1.3). Επιλέχθηκαν αυτές οι δύο δοκιμές λόγω των σημαντικών αποτελεσμάτων που προκύπτουν σε σχέση με τον χρόνο που απαιτείται για την εκτέλεση τους. Δεν κατέστη εφικτό να πραγματοποιηθούν περισσότερες δοκιμές λόγω έλλειψης δοκιμίων. Οι δοκιμές πραγματοποιούνταν αφότου τα δοκίμια αποκτούσαν τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (αφήνονταν να κρυώσουν) μετά την αφαίρεση τους από τον βιομηχανικό φούρνο.



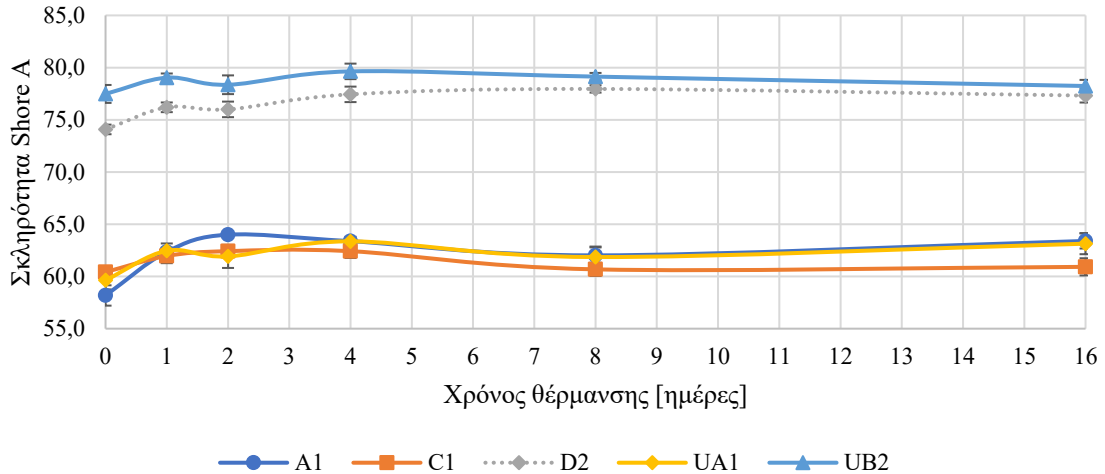
α



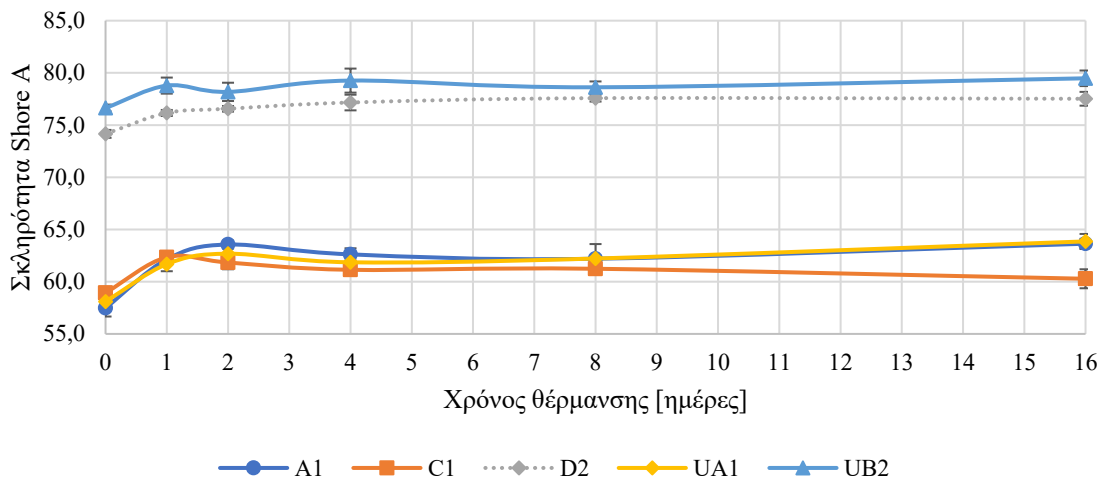
β

Σχήμα 3-122. α) Βιομηχανικός φούρνος που χρησιμοποιήθηκε για την επιταχυνόμενη γήρανση με θέρμανση στους 150 °C και β) τα δοκίμια των μονωτήρων (1 ημέρας, 2 ημερών, 4 ημερών, 8 ημερών και 16 ημερών).

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της σκληρότητας Shore A σε ένα μισό κυάθιο φαίνονται στο σχήμα 3-123 και σε δύο μισά κυάθια, τοποθετημένα το ένα επάνω στο άλλο, στο σχήμα 3-124.



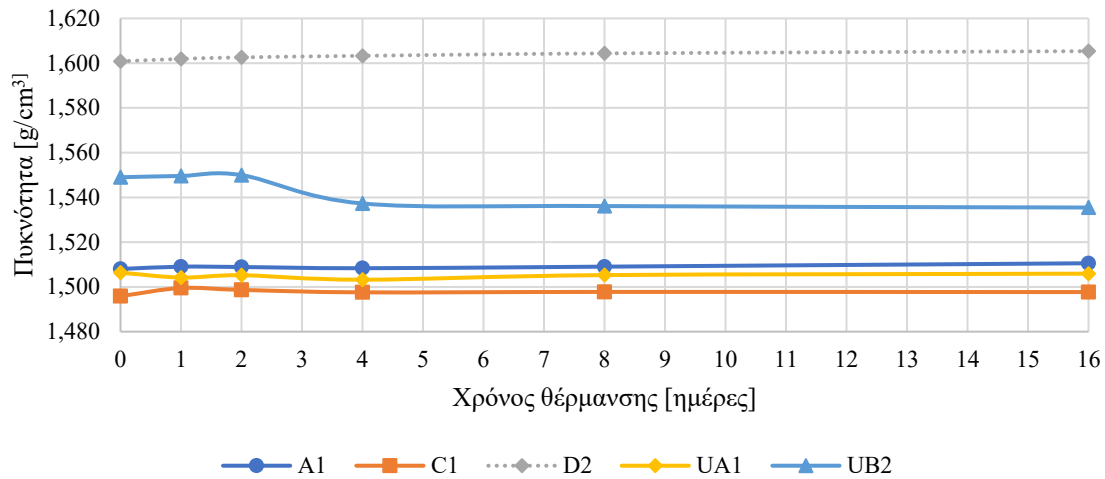
Σχήμα 3-123. Μετρήσεις της σκληρότητας Shore A σε ένα μισό κυάθιο των εξεταζόμενων μονωτήρων έπειτα από επιταχυνόμενη γήρανση με θέρμανση σε βιομηχανικό φούρνο (150 °C).



Σχήμα 3-124. Μετρήσεις της σκληρότητας Shore A σε δύο μισά κυάθια (τοποθετημένα το ένα επάνω στο άλλο) των εξεταζόμενων μονωτήρων έπειτα από επιταχυνόμενη γήρανση με θέρμανση σε βιομηχανικό φούρνο (150 °C).

Παρατηρώντας τα σχήματα 3-123 και 3-124 βλέπουμε ότι οι μετρήσεις δε μεταβλήθηκαν ιδιαίτερα όταν μετρήσαμε σε δύο μισά κυάθια (σχήμα 3-124) αντί για ένα μισό κυάθιο (σχήμα 3-123). Επίσης, παρατηρείται μια ελαφριά αύξηση της σκληρότητας Shore A καθώς αυξάνονται οι μέρες της καταπόνησης των δοκιμίων σε θέρμανση στους 150 °C, χωρίς όμως αυτή η αύξηση να είναι σημαντική. Ενδεχομένως, για να ληφθούν πιο ασφαλή συμπεράσματα, να χρειάζονται παραπάνω μέρες καταπόνησης των δοκιμίων με θέρμανση σε βιομηχανικό φούρνο.

Στο σχήμα 3-125 φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της πυκνότητας.



Σχήμα 3-125. Μετρήσεις της πυκνότητας των εξεταζόμενων μονωτήρων έπειτα από επιταχυνόμενη γήρανση με θέρμανση σε βιομηχανικό φούρνο (150 °C).

Από το σχήμα 3-125 παρατηρούμε ότι η πυκνότητα του υλικού των μονωτήρων παραμένει αμετάβλητη καθώς αυξάνονται οι ημέρες καταπόνησης των δοκιμίων σε θέρμανση στους 150 °C. Ίσως, και σε αυτήν την περίπτωση να υπάρξουν διαφορετικά συμπεράσματα, εάν οι ημέρες καταπόνησης σε θέρμανση αυξηθούν κατά πολύ, ώστε να επέλθει αισθητή γήρανση στο υλικό των συνθετικών μονωτήρων.

Κεφάλαιο 4. Συμβολή – Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η παρούσα διδακτορική διατριβή συμβάλλει στη μελέτη των συνθετικών μονωτήρων. Ουσιαστικά, πρόκειται για μία εκτενή μελέτη σε διάφορες δοκιμές ελέγχου της ποιότητας των συνθετικών μονωτήρων (που υπάρχουν σε διεθνή Πρότυπα ή και όχι - δηλαδή βρίσκονται ακόμα υπό διερεύνηση). Οι δοκιμές, οι οποίες εξετάζονται σε αυτήν τη διατριβή, είναι: ηλεκτρικές, μηχανικές, χημικές και εξετάζουν κυρίως τις φυσικοχημικές ιδιότητες και την αντοχή του μονωτικού περιβλήματος και της ράβδου των συνθετικών μονωτήρων σε ηλεκτρική, μηχανική και χημική καταπόνηση, καθώς επίσης και την μηχανική αντοχή ολόκληρων των μονωτήρων. Επιπλέον, ορισμένες από τις δοκιμές που εξετάζονται λειτουργούν σαν τεχνητή γήρανση στο υλικό των συνθετικών μονωτήρων, ώστε να αποφαινεται κανείς για την ποιότητα και την αντοχή των υλικών μετά από καταπόνηση.

4.1 Συμβολή - Πρωτοτυπία της διδακτορικής διατριβής

Τα συμπεράσματα και η συμβολή της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής παρατίθενται παρακάτω:

- Η εργασία αυτή περιλαμβάνει μία **εκτενή βιβλιογραφική έρευνα** σχετικά με τις δοκιμές και ελέγχους που πραγματοποιούνται σε συνθετικούς μονωτήρες και είτε υπάρχουν ήδη σε διεθνή Πρότυπα, είτε βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο. Με αυτόν τον τρόπο συμβάλλει στη μελέτη αυτού του θέματος.
- Αποτελεί την **πρώτη βάση δεδομένων** αναφορικά με τα αποτελέσματα δοκιμών και ελέγχων σε ένα μεγάλο πλήθος συνθετικών μονωτήρων διαφορετικών κατασκευαστών. Με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτή τη διατριβή πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις μεταξύ συνθετικών μονωτήρων:
 - I. ίδιας ηλικίας και διαφορετικών κατασκευαστών. Με αυτές τις συγκρίσεις προέκυψαν συμπεράσματα σχετικά με την ποιότητα των συνθετικών μονωτήρων διαφορετικών κατασκευαστών, ώστε να επιλέγεται ο συνθετικός μονωτήρας που εξυπηρετεί καλύτερα τις επιμέρους ανάγκες.
 - II. διαφορετικής ηλικίας και του ίδιου κατασκευαστή. Αυτές οι συγκρίσεις βοήθησαν να μελετηθούν σε βάθος χρόνου οι συνθετικοί μονωτήρες του

κάθε κατασκευαστή – προμηθευτή και να διαφανεί η αντοχή τους ανάλογα με τα έτη λειτουργίας.

III. ίδιου ή διαφορετικών κατασκευαστών μετά από τεχνητή γήρανση.

Για όλα τα προαναφερθέντα ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στην αναλυτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του Κεφαλαίου 3 της παρούσης διατριβής. Μέσω των πολυάριθμων αποτελεσμάτων δοκιμών και ελέγχων που παρατίθενται, η διατριβή αυτή προσθέτει επιπλέον γνώση στον έλεγχο της ποιότητας των συνθετικών μονωτήρων.

- Με την τεχνογνωσία και την πληροφορία που υπάρχει σε αυτήν την διατριβή είναι εφικτό να γραφεί μια **Τεχνική Οδηγία για τον ΔΕΔΔΗΕ**, η οποία θα βοηθάει και θα κατατοπίζει σχετικά με τις δοκιμές των συνθετικών μονωτήρων (βλέπε πίνακα 3-7) κατά τη διαδικασία παραλαβής μεγάλων παρτίδων.
- Στον πίνακα 4-1 παρουσιάζεται η συμβολή της διατριβής αυτής σχετικά με την αξιολόγηση της σημασίας της κάθε δοκιμής. Ουσιαστικά γίνεται μια αποσαφήνιση και καταγραφή των πιο **σημαντικών ευρημάτων της κάθε δοκιμής**. Επιπλέον, παρουσιάζεται η συμβολή της διατριβής είτε α) στην **αναθεώρηση παλιών διεθνών Προτύπων** αλλά και στη **δημιουργία νέων**, είτε β) στη **βελτιστοποίηση της διαδικασίας και του τρόπου εκτέλεσης των δοκιμών** που εξετάστηκαν.

Πίνακας 4-1. Συμβολή της διατριβής: α) στην αποσαφήνιση και καταγραφή των πιο σημαντικών ευρημάτων των δοκιμών που εξετάστηκαν, β) στην αναθεώρηση παλιών διεθνών Προτύπων ή στη δημιουργία νέων για αυτές τις δοκιμές και γ) στην βελτιστοποίηση της διαδικασίας και του τρόπου εκτέλεσης των δοκιμών .

Δοκιμή	Σημαντικά ευρήματα	Προτάσεις τροποποιήσεων στα διεθνή Πρότυπα ή Συμβολή στη διαδικασία της δοκιμής
Οπτική επιθεώρηση	Γρήγορη εκτίμηση της συνολικής κατάστασης του συνθετικού μονωτήρα.	Προτείνεται η δημιουργία Προτύπου με ενσωμάτωση των ευρημάτων αυτής της διατριβής, αλλά και όλης της σχετικής βιβλιογραφίας, ως κατευθυντήριες γραμμές, ώστε να μην εξαρτάται το αποτέλεσμα από αυτόν που εκτελεί τη δοκιμή.
Υδροφοβικότητα	1) Εκτίμηση της υδροφοβικότητας του μονωτικού περιβλήματος. 2) Δείκτης ποιότητας του υλικού. 3) Εκτίμηση της γήρανσης του υλικού.	1) Προτείνεται η χρήση του νευρωνικού δικτύου που υλοποιήθηκε σε αυτήν τη διατριβή για άρση του προβλήματος της υποκειμενικής κρίσης κατά την κατάταξη σε κλάση υδροφοβικότητας. 2) Προτείνεται επίσης, χρήση του νευρωνικού δικτύου σε drone για γρηγορότερη και ευκολότερη επιθεώρηση των μονωτήρων στη θέση εγκατάστασης τους στα ηλεκτρικά δίκτυα (στόλους, πυλώνες κλπ.).

<p>Σκληρότητα</p>	<p>1) Εκτίμηση της σκληρότητας του μονωτικού περιβλήματος. 2) Δείκτης ποιότητας του υλικού. 3) Εκτίμηση της γήρανσης του υλικού.</p>	<p>1) Προτείνεται προσθήκη στο Πρότυπο ISO 48-4 [59] μεθοδολογίας εκτέλεσης της δοκιμής σε μονωτήρες (τελικά προϊόντα). Επί του παρόντος, το Πρότυπο αναφέρεται μόνο σε κομμάτια μονωτικού υλικού κατασκευασμένα ειδικά για την εκτέλεση της συγκεκριμένης δοκιμής. 2) Ανάδειξη της περιοχής των κυαθίων των συνθετικών μονωτήρων στην οποία θα πρέπει να γίνεται η μέτρηση (κεντρική περιοχή των κυαθίων), ώστε να ελαχιστοποιείται ο χρόνος της δοκιμής και να υπάρχει ικανοποιητική ακρίβεια. 3) Προτείνεται μεθοδολογία υπολογισμού της αβεβαιότητας. Επί του παρόντος, το πρότυπο αναφέρεται σε αριθμό μετρήσεων ανά δοκίμιο, αλλά δε δίνει μεθοδολογία επεξεργασίας των μετρήσεων και υπολογισμού αβεβαιότητας. 4) Η τεχνητή γήρανση με βρασμό 42 h πριν τη δοκιμή (που εφαρμόστηκε στη συγκεκριμένη διατριβή) δεν είναι απαραίτητο να πραγματοποιείται, καθώς δεν έδωσε τα αναμενόμενα αποτελέσματα.</p>
<p>Πυκνότητα</p>	<p>1) Εκτίμηση της πυκνότητας του μονωτικού περιβλήματος. 2) Δείκτης ποιότητας του υλικού. 3) Δείκτης για το αν το υλικό είναι το HTV Silicone Rubber με πρόσμιξη ATH.</p>	<p>Προτείνεται προσθήκη στο Πρότυπο ISO 2781 [75] μεθοδολογίας για εκτέλεση της δοκιμής σε μονωτήρες (τελικά προϊόντα). Επί του παρόντος, το Πρότυπο είναι γενικό και δεν αναφέρεται σε συνθετικούς μονωτήρες και σε μεθοδολογία δημιουργίας των δοκιμίων από μονωτήρες (τελικά προϊόντα).</p>
<p>Κεκλιμένο επίπεδο</p>	<p>1) Έλεγχος της ανθεκτικότητας του μονωτικού περιβλήματος στο φαινόμενο δημιουργίας αγώγιμων οδύσεων άνθρακα και στη διάβρωση (tracking and erosion). 2) Εξακρίβωση της επάρκειας του πληρωτικού υλικού ATH στο μονωτικό περίβλημα.</p>	<p>1) Προτείνεται προσθήκη στο Πρότυπο IEC 60587 [84]: α) μεθοδολογίας για εκτέλεση της δοκιμής σε μονωτήρες (τελικά προϊόντα). β) η πραγματοποίηση της δοκιμής να γίνεται σε περισσότερα από 5 δοκίμια (που απαιτεί, επί του παρόντος, το Πρότυπο) από τον κάθε μονωτήρα για πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. γ) τα δοκίμια (κυάθια) να λαμβάνονται από όλο το μήκος του μονωτήρα ώστε να εξετάζεται καλύτερα η ομοιομορφία του υλικού. 2) Η τεχνητή γήρανση με βρασμό 42 h πριν τη δοκιμή (που εφαρμόστηκε στη συγκεκριμένη διατριβή) δεν είναι απαραίτητο να πραγματοποιείται, καθώς δεν έδωσε τα αναμενόμενα αποτελέσματα.</p>
<p>Εφελκυσμός (tensile strength) και Μέγιστη</p>	<p>1) Εκτίμηση του εφελκυσμού και της μέγιστης επιμήκυνσης του μονωτικού περιβλήματος.</p>	<p>Προτείνεται προσθήκη στο Πρότυπο ISO 37 [93] μεθοδολογίας για εκτέλεση της δοκιμής σε μονωτήρες (τελικά</p>

επιμήκυνση (maximum elongation)	2) Δείκτης ποιότητας του υλικού.	προϊόντα). Επί του παρόντος, το Πρότυπο είναι γενικό και δεν αναφέρεται σε συνθετικούς μονωτήρες και σε μεθοδολογία δημιουργίας των δοκιμών από μονωτήρες (τελικά προϊόντα).
Σκίσιμο (tear strength)	1) Εκτίμηση της αντοχής του μονωτικού περιβλήματος σε σκίσιμο. 2) Δείκτης ποιότητας του υλικού.	Προτείνεται προσθήκη στο Πρότυπο ISO 34-1 [104] μεθοδολογίας για εκτέλεση της δοκιμής σε μονωτήρες (τελικά προϊόντα). Επί του παρόντος, το Πρότυπο είναι γενικό και δεν αναφέρεται σε συνθετικούς μονωτήρες και σε μεθοδολογία δημιουργίας των δοκιμών από μονωτήρες (τελικά προϊόντα).
Φασματοσκοπία υπέρυθρων μετασ/μού Fourier (FTIR)	1) Δείκτης για το αν το υλικό είναι το HTV Silicone Rubber με πρόσμιξη ΑΤΗ. 2) Εκτίμηση της ποσότητας του πληρωτικού υλικού ΑΤΗ στο μονωτικό περίβλημα. 3) Εκτίμηση της γήρανσης του υλικού. 4) Συμπέρασμα έπειτα από σύγκριση φασμάτων FTIR διαφορετικών δοκιμών (μονωτήρων).	1) Προτείνεται να συμπεριληφθεί η δοκιμή αυτή στις απαιτούμενες δοκιμές για την αξιολόγηση της ποιότητας των συνθετικών μονωτήρων μέσω της δημιουργίας Προτύπου, στο οποίο θα ενσωματωθούν τα ευρήματα αυτής της διατριβής, αλλά και όλης της σχετικής βιβλιογραφίας. 2) Προτείνεται μεθοδολογία για εκτέλεση της δοκιμής σε μονωτήρες (τελικά προϊόντα) και όχι απλώς σε κομμάτια υλικού (ελαστικού).
Θερμοβαρυστική ανάλυση (TGA)	1) Δείκτης για το αν το υλικό είναι το HTV Silicone Rubber με πρόσμιξη ΑΤΗ. 2) Εκτίμηση της ποσότητας του πληρωτικού υλικού ΑΤΗ στο μονωτικό περίβλημα. 3) Συμπέρασμα έπειτα από σύγκριση διαγραμμάτων TGA διαφορετικών δοκιμών (μονωτήρων).	Προτείνεται προσθήκη στο Πρότυπο ISO 11358-1 [121] μεθοδολογίας για εκτέλεση της δοκιμής σε μονωτήρες (τελικά προϊόντα). Επί του παρόντος, το Πρότυπο είναι γενικό και δεν αναφέρεται σε συνθετικούς μονωτήρες και σε μεθοδολογία δημιουργίας των δοκιμών από μονωτήρες (τελικά προϊόντα).
Αντίσταση μονωτικού περιβλήματος σε οξεία	Προσομοιώνει την καταπόνηση από νιτρικό οξύ την οποία υφίστανται οι συνθετικοί μονωτήρες στο ηλεκτρικό δίκτυο.	Προτείνεται έπειτα από επιπλέον διερεύνηση της σύστασης του διαλύματος οξέος και την εφαρμογή της δοκιμής σε περισσότερα δοκίμια, να δημιουργηθεί Πρότυπο με ενσωμάτωση των ευρημάτων αυτής της διατριβής αλλά και όλης της σχετικής βιβλιογραφίας.
Δοκιμή διάχυσης νερού (Water diffusion test)	Δείκτης ποιότητας της ράβδου των συνθετικών μονωτήρων.	Προτείνεται η ενσωμάτωση στο Πρότυπο IEC 62217 [151] επιπλέον δοκιμής στα 18 kVac για 30 s, όταν πρόκειται για καινούριους μονωτήρες.
Δοκιμή διείσδυσης βαφής (Dye penetration test)	Δείκτης ποιότητας της ράβδου των συνθετικών μονωτήρων.	Προτείνεται αναθεώρηση του Προτύπου IEC 62217 [151], ώστε: * είτε η δοκιμή να γίνει πιο ήπια: α) μειώνοντας τον χρόνο των 15 λεπτών, β) μειώνοντας την περιεκτικότητα του διεισδυτικού υγρού στο διάλυμα, γ) αντικαθιστώντας το διεισδυτικό υγρό με κάποιο πιο ήπιο, * είτε να μειωθεί το ποσοστό των δοκιμών που θα πρέπει να επιτύχουν

		από 100% σε 70%, ώστε το αποτέλεσμα της δοκιμής να είναι επιτυχές. Στην παρούσα διατριβή κανένας καινούριος μονωτήρας δεν είχε 100% επιτυχία.
Σύνδεση ράβδου – μονωτικού περιβλήματος	Δείκτης ποιότητας της κόλλησης μεταξύ ράβδου και μονωτικού περιβλήματος.	1) Προτείνεται προσθήκη της διαδικασίας σε κάποιο Πρότυπο. 2) Βρέθηκε συμφωνία των αποτελεσμάτων της δοκιμής με τα αποτελέσματα της δοκιμής διάχυσης νερού σε ποσοστό 81%.
Εφελκυσμός μονωτήρων ανάρτησης. Εκδοχή Α. (μηχανική δοκιμή)	Διερεύνηση της μηχανικής αντοχής των μονωτήρων ανάρτησης σε εφελκυσμό.	Προτείνεται η ενσωμάτωση στο Πρότυπο IEC 61109 [183] της διαδικασίας του υποκεφαλαίου 3.5.1.4, με σκοπό την εξοικονόμηση έως και 96 ωρών κατά την εκτέλεση της δοκιμής.
Εφελκυσμός μονωτήρων ανάρτησης. Εκδοχή Β. (μηχανική δοκιμή)		
Εφελκυσμός μονωτήρων ανάρτησης. Εκδοχή Γ. (μηχανική δοκιμή)		
Κάμψη μονωτήρων στήριξης. (μηχανική δοκιμή)	Διερεύνηση της μηχανικής αντοχής των μονωτήρων στήριξης σε κάμψη.	Προτείνεται η ενσωμάτωση στο Πρότυπο IEC 61952 [193] της διαδικασίας του υποκεφαλαίου 3.5.2 διάρκειας 3 λεπτών και η χρήση της, κατά τις διαδικασίες παραλαβής παρτίδων μονωτήρων, έναντι της έως τώρα υφιστάμενης διαδικασίας του Προτύπου διάρκειας 96 ωρών.

- Από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, στους συνθετικούς μονωτήρες διαφορετικών κατασκευαστών, διαφορετικής χρονολογίας κατασκευής και διαφορετικού επιπέδου γήρανσης, προκύπτει η συμβολή της διατριβής στη **διαμόρφωση των προσδοκώμενων ευρών τιμών των δοκιμών** σε παρόμοιους συνθετικούς μονωτήρες με υλικό μονωτικού περιβλήματος: **HTV Silicone Rubber με πρόσμιξη υλικού ATH**. Τα προαναφερθέντα φαίνονται στον πίνακα 4-2.

Πίνακας 4-2. Συμβολή της διατριβής στη διαμόρφωση των προσδοκώμενων αποτελεσμάτων των δοκιμών (εύρη τιμών) σε συνθετικούς μονωτήρες (καινούριους και μεταχειρισμένους) με υλικό μονωτικού περιβλήματος HTV Silicone Rubber με πρόσμιξη υλικού ATH.

Δοκιμή	Προσδοκώμενο εύρος τιμών	
	Καινούριοι μονωτήρες	Μεταχειρισμένοι μονωτήρες
Οπτική επιθεώρηση	Άριστη κατάσταση.	Καλή κατάσταση.
Υδροφοβικότητα	1 – 3 κλάση υδροφοβικότητας	4 - 7 κλάση υδροφοβικότητας
Σκληρότητα	56 – 75 Shore A	Μεγαλύτερες τιμές από τους αντίστοιχους καινούριους (επηρεάζεται από τη γήρανση).
Πυκνότητα	$\geq 1,5 \text{ g/cm}^3$	* Ίδιες τιμές με τους καινούριους (δεν επηρεάζεται από τη γήρανση). * Η τιμή της πυκνότητας δεν επηρεάζεται από το εάν το

		δοκίμιο βρισκόταν πλησίον της εφαρμοζόμενης τάσης στον μονωτήρα ή όχι, κατά τη διάρκεια λειτουργίας του στο δίκτυο (σχήμα 3-41 / άκρο υπό τάση, μέσον, άκρο χωρίς τάση).
Κεκλιμένο επίπεδο	Επιτυχία σε όλα τα εξεταζόμενα δοκίμια	Επιτυχία σε όλα τα εξεταζόμενα δοκίμια (επηρεάζεται ελαφρώς από τη γήρανση, αλλά η δοκιμή θα πρέπει να είναι επιτυχημένη, αλλιώς το υλικό είναι ακατάλληλο).
Εφελκυσμός (tensile strength)	2,4 – 6,0 N/mm ²	Δεν προέκυψε σαφές συμπέρασμα σχετικά με το πως επιδρά η γήρανση στο αποτέλεσμα της δοκιμής.
Μέγιστη επιμήκυνση (maximum elongation)	150 – 560 %	Μικρότερες τιμές από τους αντίστοιχους καινούριους. Από τα αποτελέσματα φαίνεται να μπορεί να προκύψει αντιστοιχία μεταξύ του αποτελέσματος της δοκιμής και των ετών λειτουργίας του μονωτήρα στο δίκτυο (επηρεάζεται από τη γήρανση).
Σκίσιμο (tear strength)	12,5 – 20,0 N/mm	Δεν προέκυψε σαφές συμπέρασμα σχετικά με το πως επιδρά η γήρανση στο αποτέλεσμα της δοκιμής.
Φασματοσκοπία υπέρυθρων μετασμού Fourier (FTIR)	Η μορφή των φασμάτων FTIR (και των κορυφών που υπάρχουν) θα πρέπει να είναι παρόμοια με τα σχήματα A-1 έως A-11 του Παραρτήματος Α.	Οι κορυφές των φασμάτων FTIR, σε δοκίμια από την επιφάνεια του υλικού, είναι μικρότερες σε σχέση με τους αντίστοιχους καινούριους μονωτήρες.
Θερμοβαρμετρική ανάλυση (TGA)	1) Η μορφή των διαγραμμάτων TGA θα πρέπει να είναι παρόμοια με τα σχήματα B-1 έως B-10 του Παραρτήματος Β. 2) Προκύπτουσα περιεκτικότητα σε πληρωτικό υλικό ΑΤΗ: 33 – 51 %.	Παρόμοια διαγράμματα TGA με των αντίστοιχων καινούριων μονωτήρων (δοκίμια από το εσωτερικό του υλικού).
Αντίσταση μονωτικού περιβλήματος σε οξεία	Η δοκιμή παραμένει σε ερευνητικό στάδιο. Θα πρέπει το αποτέλεσμα να είναι επιτυχές, αν και στη συγκεκριμένη διατριβή όλοι οι μονωτήρες απέτυχαν. Θα πρέπει να γίνει επιπλέον έρευνα ως προς την ένταση του διαλύματος οξέος ή / και τη διάρκεια της δοκιμής.	Η δοκιμή δεν πραγματοποιήθηκε σε μεταχειρισμένους μονωτήρες.
Δοκιμή διάχυσης νερού (Water diffusion test)	1) Επιτυχία στα 12 kVac. 2) Επιτυχία στα 18 kVac. 3) Ρεύμα διαρροής ≤ 1 mA (39 μΑ – 308 μΑ).	1) Επιτυχία στα 12 kVac. 2) Ρεύμα διαρροής ≤ 1 mA (38 μΑ – 840 μΑ).
Δοκιμή διείσδυσης βαφής (Dye penetration test)	Θα πρέπει να γίνει επιπλέον διερεύνηση. Σύμφωνα με το IEC 62217 [151] θα πρέπει το 100% των δοκιμών να επιτύχει.	Υπό διερεύνηση. Χρειάζονται περισσότεροι μεταχειρισμένοι μονωτήρες προς έλεγχο (το αποτέλεσμα της δοκιμής

	Από τα αποτελέσματα της διατριβής προτείνεται να θεωρείται αποδεκτή επιτυχία των δοκιμών $\geq 70\%$.	φαίνεται να μην επηρεάζεται από τη γήρανση των μονωτήρων).
Σύνδεση ράβδου – μονωτικού περιβλήματος	Θα πρέπει να εμφανίζεται μόνο σκίσιμο, χωρίς αποκόλληση του μονωτικού περιβλήματος από τη ράβδο.	Θα πρέπει να εμφανίζεται μόνο σκίσιμο, χωρίς αποκόλληση του μονωτικού περιβλήματος από τη ράβδο (το αποτέλεσμα της δοκιμής φαίνεται να μην επηρεάζεται από τη γήρανση των μονωτήρων).
Εφελκυσμός μονωτήρων ανάρτησης. Εκδοχή Α. (μηχανική δοκιμή)	1) RTL: επιτυχία σε όλα τα δοκίμια. 2) Αστοχία του μονωτήρα σε δύναμη > του SML. Αποδεκτοί τρόποι αστοχίας: σπάσιμο μεταλλικών ακροδεκτών, ξεγλίστρημα της ράβδου από τους μεταλλικούς ακροδέκτες.	Η δοκιμή δεν πραγματοποιήθηκε σε μεταχειρισμένους μονωτήρες λόγω έλλειψης δοκιμίων.
Εφελκυσμός μονωτήρων ανάρτησης. Εκδοχή Β. (μηχανική δοκιμή)	1) RTL: επιτυχία σε όλα τα δοκίμια. 2) Βλέπε τελευταία παράγραφο του υποκεφαλαίου 3.5.1.4.	Η δοκιμή δεν πραγματοποιήθηκε σε μεταχειρισμένους μονωτήρες λόγω έλλειψης δοκιμίων.
Εφελκυσμός μονωτήρων ανάρτησης. Εκδοχή Γ. (μηχανική δοκιμή)	Να πραγματοποιείται μόνο αν χρειάζεται (Βλέπε τελευταία παράγραφο του υποκεφαλαίου 3.5.1.4.)	Η δοκιμή δεν πραγματοποιήθηκε σε μεταχειρισμένους μονωτήρες λόγω έλλειψης δοκιμίων.
Κάμψη μονωτήρων στήριξης. (μηχανική δοκιμή)	1) Το MDCL με τη γρήγορη δοκιμή του υποκεφαλαίου 3.5.2 επαληθεύει το MDCL της προδιαγραφής του μονωτήρα. 2) Δοκιμή SCL: επιτυχία 3) CFL > SCL	Η δοκιμή δεν πραγματοποιήθηκε σε μεταχειρισμένους μονωτήρες λόγω έλλειψης δοκιμίων.

- Καταγράφηκαν οι χρόνοι προετοιμασίας και εκτέλεσης των δοκιμών που εξετάζονται. Στις δοκιμές που εκτελέστηκαν σε αυτή τη διδακτορική διατριβή γίνεται **αντιπαραβολή του χρόνου που απαιτεί η διαδικασία του εκάστοτε διεθνούς Προτύπου και του χρόνου που απαιτείται για την δοκιμή αν ακολουθηθεί η διαδικασία που προτείνεται από τη συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή.** Στον πίνακα 4-3 παρουσιάζεται ο χρόνος εκτέλεσης της κάθε δοκιμής, είτε σύμφωνα με τις έως τώρα εφαρμοζόμενες διαδικασίες (2^η στήλη), είτε σύμφωνα με τις διαδικασίες που προτάθηκαν από τη συγκεκριμένη διατριβή (3^η στήλη).

Πίνακας 4-3. Χρόνοι εκτέλεσης των δοκιμών για έναν συνθετικό μονωτήρα σύμφωνα με τις έως τώρα εφαρμοζόμενες διαδικασίες, είτε σύμφωνα με τις διαδικασίες που προτάθηκαν από τη συγκεκριμένη διατριβή.

Δοκιμή	Χρόνος εκτέλεσης σύμφωνα με τις έως τώρα εφαρμοζόμενες διαδικασίες	Χρόνος εκτέλεσης σύμφωνα με τις διαδικασίες που προτάθηκαν από τη συγκεκριμένη διατριβή
Οπτική επιθεώρηση	1 – 5 λεπτά	Ο χρόνος εκτέλεσης παραμένει ίδιος. Η διατριβή αυτή

	Εξαρτάται από την εμπειρία του επιθεωρητή. (Δεν υπάρχει Πρότυπο)	προσθέτει επιπλέον γνώση (περιπτώσεις μονωτήρων) στο θέμα αυτό.
Υδροφοβικότητα	5 λεπτά σε αποξηλωμένους μονωτήρες από το δίκτυο (IEC TS 62073 [38])	Με τη χρήση του νευρωνικού δικτύου που υλοποιήθηκε σε αυτή τη διατριβή μπορούν με τη βοήθεια drones να εξετάζονται πολλοί εγκατεστημένοι στο δίκτυο μονωτήρες, χωρίς να απαιτείται η αποξήλωση τους.
Σκληρότητα	10 λεπτά (ISO 48-4 [59])	Ο χρόνος εκτέλεσης παραμένει ίδιος. Η τεχνητή γήρανση με βρασμό 42 h πριν τη δοκιμή (που εφαρμόστηκε στη συγκεκριμένη διατριβή) δεν είναι απαραίτητο να πραγματοποιείται, καθώς δεν έδωσε τα αναμενόμενα αποτελέσματα.
Πυκνότητα	Μέθοδος Α: 10 λεπτά Μέθοδος Β: 30 λεπτά (ISO 2781 [75])	Ο χρόνος εκτέλεσης παραμένει ίδιος. Από τα αποτελέσματα της διατριβής προτείνεται να εφαρμόζεται η Μέθοδος Α.
Κεκλιμένο επίπεδο	6 ώρες (IEC 60587 [84])	Ο χρόνος εκτέλεσης παραμένει ίδιος. Η τεχνητή γήρανση με βρασμό 42 h πριν τη δοκιμή (που εφαρμόστηκε στη συγκεκριμένη διατριβή) δεν είναι απαραίτητο να πραγματοποιείται, καθώς δεν έδωσε τα αναμενόμενα αποτελέσματα.
Εφελκυσμός (tensile strength) και Μέγιστη επιμήκυνση (maximum elongation)	10 λεπτά (ISO 37 [93])	Ο χρόνος εκτέλεσης παραμένει ίδιος.
Σκίσιμο (tear strength)	10 λεπτά (ISO 34-1 [104])	Ο χρόνος εκτέλεσης παραμένει ίδιος.
Φασματοσκοπία υπέρυθρων μετασ/μού Fourier (FTIR)	2 λεπτά (Δεν υπάρχει Πρότυπο, Βοηθητικός οδηγός: Cigre Technical Brochure 595 [113])	Ο χρόνος εκτέλεσης παραμένει ίδιος.
Θερμοβαρυμετρική ανάλυση (TGA)	2 ώρες (3 δοκίμια x 40 λεπτά) (ISO 11358-1 [121]) Βοηθητικός οδηγός: Cigre Technical Brochure 595 [113])	Ο χρόνος εκτέλεσης παραμένει ίδιος.
Αντίσταση μονωτικού περιβλήματος σε οξεία	Δεν υπάρχει Πρότυπο	1 ώρα προετοιμασία δοκιμίων + 100 ώρες εμβάπτιση σε οξύ + 12 ώρες στέγνωμα = 113 ώρες Η μεθοδολογία της δοκιμής που παρουσιάστηκε στη συγκεκριμένη διατριβή περιλαμβάνει: * εμβάπτιση μέσα στο διάλυμα οξέως (100 ώρες) * στέγνωμα σε φούρνο (12 ώρες).

		Τα 2 παραπάνω μπορούν να εφαρμοστούν σε πολλά δοκίμια διαφορετικών μονωτήρων ταυτόχρονα.
Δοκιμή διάχυσης νερού (Water diffusion test)	1 ώρα προετοιμασία δοκιμίων + 100 ώρες βρασμός + 15 λεπτά δοκιμή ≈ 101 ώρες (IEC 62217 [151])	Ο βρασμός σε διάλυμα NaCl μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλά δοκίμια διαφορετικών μονωτήρων ταυτόχρονα.
Δοκιμή διείσδυσης βαφής (Dye penetration test)	1 ώρα προετοιμασία δοκιμίων + 30 λεπτά διαδικασία δοκιμής = 1,5 ώρες (IEC 62217 [151])	Ο χρόνος εκτέλεσης παραμένει ίδιος.
Σύνδεση ράβδου – μονωτικού περιβλήματος	(Δεν υπάρχει Πρότυπο)	10 λεπτά Προτείνεται εκτέλεση της δοκιμής αυτής μετά τη δοκιμή διάχυσης νερού, ώστε να δοκιμάζονται τα ήδη καταπονημένα με βρασμό δοκίμια.
Εφελκυσμός μονωτήρων ανάρτησης. Εκδοχή Α. (μηχανική δοκιμή)	(Δεν αναφέρεται σε Πρότυπο)	3 λεπτά
Εφελκυσμός μονωτήρων ανάρτησης. Εκδοχή Β. (μηχανική δοκιμή)	(Δεν αναφέρεται σε Πρότυπο)	Οι εκδοχές Α και Β προτείνονται από τη συγκεκριμένη διατριβή για την πιθανή αποφυγή της πολύωρης δοκιμής, 96 ωρών, που περιγράφεται στο Πρότυπο IEC 61109 [183] (βλ. προτεινόμενη διαδικασία του υποκεφαλαίου 3.5.1.4.).
Εφελκυσμός μονωτήρων ανάρτησης. Εκδοχή Γ. (μηχανική δοκιμή)	96 ώρες (IEC 61109 [183])	Προτείνεται να εκτελείται μόνο αν χρειάζεται, σύμφωνα με τη διαδικασία του υποκεφαλαίου 3.5.1.4.
Κάμψη μονωτήρων στήριξης. (μηχανική δοκιμή)	96 ώρες (IEC 61952 [193])	3 λεπτά (με τη διαδικασία που προτάθηκε από την πηγή [29] και επαληθεύτηκε από τη συγκεκριμένη διατριβή - υποκεφάλαιο 3.5.2)

- Για την πληρέστερη μελέτη και κατανόηση της **υδροφοβής συμπεριφοράς** των συνθετικών μονωτήρων αναπτύχθηκαν μοντέλα συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης και στήριξης, στα οποία έγιναν **πεδιακές προσομοιώσεις** μέσω του προγράμματος COMSOL Multiphysics και του επιλύτη Electric Currents. Πιο συγκεκριμένα μελετήθηκε και προσομοιώθηκε η κατανομή του δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου σε μονωτήρες ανάρτησης και στήριξης που ανήκαν στις κλάσεις υδροφοβικότητας 2, 4 και 7 και σε στεγνό μονωτήρα (χωρίς σταγόνες επάνω του), ώστε να προκύψουν συγκρίσεις μεταξύ τους. Το αποτέλεσμα που προέκυψε από τις προσομοιώσεις καταδεικνύει ότι καθώς το υλικό των συνθετικών μονωτήρων

γηράσκει με τα χρόνια λειτουργίας τους στα ηλεκτρικά δίκτυα, και άρα η κλάση υδροφοβικότητας τους μεγαλώνει, θα εμφανίζονται μεγαλύτερες εντάσεις ηλεκτρικού πεδίου κοντά στο άκρο των μονωτήρων το οποίο έρχεται σε επαφή με την τάση στην περίπτωση που οι συνθετικοί μονωτήρες είναι βρεγμένοι.

- Για τη λεπτομερή ανάλυση και μελέτη της **δοκιμής του κεκλιμένου επιπέδου** σε συνθετικούς μονωτήρες αναπτύχθηκαν και προσομοιώθηκαν μοντέλα που περιλάμβαναν: τα δοκίμια των μονωτήρων, τον θάλαμο της συσκευής δοκιμής κεκλιμένου επιπέδου της εταιρίας Alpha Tec Medientechnik GmbH, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή και τα δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια που απαιτούνται για την εκτέλεση της δοκιμής (σε κάθε ένα από τα 5 δοκίμια). Πραγματοποιήθηκαν **πεδιακές προσομοιώσεις** κατανομής του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μέσω του προγράμματος COMSOL Multiphysics και του επιλύτη Electric Currents. Προσομοιώθηκαν 4 περιπτώσεις μοντέλων: α) με δοκίμια σχεδιασμένα σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 60587 [84] και με ευθεία διαδρομή ρυπαντικού υγρού, β) με δοκίμια σχεδιασμένα σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 60587 [84] και με ακανόνιστη διαδρομή ρυπαντικού υγρού, γ) με δοκίμια σχεδιασμένα σαν μισά κυάθια πραγματικού μονωτήρα και με ευθεία διαδρομή ρυπαντικού υγρού, δ) με δοκίμια σχεδιασμένα σαν μισά κυάθια πραγματικού μονωτήρα και με ακανόνιστη διαδρομή ρυπαντικού υγρού. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι: 1) σε όλα τα μοντέλα εμφανίζονταν μεγαλύτερες τιμές ηλεκτρικού πεδίου στα δύο ακριανά (αριστερό και δεξιό) από τα 5 δοκίμια, 2) η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι μεγαλύτερη κοντά στις περιοχές του επάνω ηλεκτροδίου (αυτού που έχει 4,5 kVac), 3) οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι μεγαλύτερες στα μοντέλα 1 και 2 (δοκίμια σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 60587 [84]).

Στη συνέχεια, παρατίθενται λεπτομερέστερες επεξηγήσεις για όσες, από τις προαναφερθείσες στους πίνακες 4-1, 4-2 και 4-3, συμβολές της διατριβής χρειάζεται.

- ✓ Στην παρούσα διατριβή παρουσιάζεται, αναλύεται, επεξηγείται και βελτιστοποιείται, όπου αυτό είναι εφικτό, η **μεθοδολογία με την οποία πραγματοποιείται η κάθε δοκιμή**. Τα διεθνή Πρότυπα, σύμφωνα με τα οποία πραγματοποιούνται οι δοκιμές τύπου στους συνθετικούς μονωτήρες, τις περισσότερες φορές απαιτούν δοκίμια, συγκεκριμένων διαστάσεων και μορφολογίας. Μέχρι τώρα αυτά τα δοκίμια θα πρέπει να κατασκευαστούν επί τούτου για την πραγματοποίηση της κάθε δοκιμής τύπου,

δηλαδή από τον κατασκευαστή του μονωτικού υλικού του μονωτήρα. Η εφαρμογή του προαναφερθέντος είναι δύσκολη σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως π.χ. η παραλαβή συνθετικών μονωτήρων, όπου δεν είναι επιθυμητό να ζητηθεί από τον κατασκευαστή η δημιουργία δοκιμίων για την πραγματοποίηση δοκιμών, αλλά πρέπει να δοκιμαστούν οι ίδιοι οι μονωτήρες που ζητήθηκαν κατά την παραγγελία. Στο κεφάλαιο 3 παρατίθενται όλες οι λεπτομέρειες, οι τροποποιήσεις και οι παραδοχές που θα πρέπει να γίνουν κατά την παρασκευή των δοκιμίων, αλλά και κατά τις δοκιμές, ώστε αυτές να πραγματοποιηθούν στο υλικό που λαμβάνεται από τους συνθετικούς μονωτήρες (από το τελικό προϊόν). Επίσης, οι παραπάνω προτάσεις του τρόπου πραγματοποίησης των δοκιμών προτείνεται να ενσωματωθούν και στα διεθνή Πρότυπα, έτσι ώστε να δοκιμάζεται ο συνθετικός μονωτήρας ως τελικό προϊόν και να μην ζητείται η παρασκευή των δοκιμίων εκ νέου από τους κατασκευαστές. Έτσι, αυξάνεται η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων των δοκιμών παραλαβής, καθώς εξαλείφεται ο κίνδυνος, ο κατασκευαστής να μην παρέχει δοκίμια από το ίδιο υλικό.

- ✓ Αναπτύχθηκε επίσης ένα **νευρωνικό δίκτυο** για την κατηγοριοποίηση των συνθετικών μονωτήρων σε κλάσεις **υδροφοβικότητας**. Το νευρωνικό αυτό δίκτυο εκπαιδεύτηκε με περίπου 4500 φωτογραφίες ψεκασμένων μονωτήρων και επετεύχθη, για πρώτη φορά, συνολική ακρίβεια κατηγοριοποίησης των συνθετικών μονωτήρων σε κλάσεις υδροφοβικότητας της τάξης του 98%. Επιπλέον πλεονεκτήματα αυτού του νευρωνικού δικτύου είναι: α) δεν απαιτούνται φωτογραφίες υψηλής ποιότητας και ευκρίνειας, β) η κλάση υδροφοβικότητας των μονωτήρων αναγνωρίζεται ακόμη και αν, ως είσοδος, δοθούν φωτογραφίες που λήφθηκαν με κακή γωνία λήψης, γ) το χρώμα των μονωτήρων δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα, δ) ο χρόνος εκπαίδευσης του δικτύου αυτού είναι πολύ μικρός (περίπου 30 λεπτά), ε) μπορεί να ενσωματωθεί σε μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα (drones) με σκοπό την απομακρυσμένη επιθεώρηση των συνθετικών μονωτήρων (με τη μέθοδο της υδροφοβικότητας) στα δίκτυα διανομής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, πιθανόν ακόμα και όταν αυτά είναι ηλεκτρισμένα, χωρίς να χρειάζεται απομόνωση τους (χρειάζεται διερεύνηση – δοκιμές). Το προαναφερθέν νευρωνικό δίκτυο και η γενικότερη ιδέα έχει βραβευτεί τον Δεκέμβρη του 2021 από τη CIGRE ως η καλύτερη δημοσίευση στην Ενότητα B2 «Overhead Lines (Εναέριες Γραμμές)» και τον Δεκέμβρη του 2022 από τον ΔΕΔΔΗΕ έλαβε το 3^ο βραβείο (μεταξύ 91 συμμετοχών) στον διαγωνισμό καινοτομίας «Καινοτομώ@dieddie».

- ✓ Πραγματοποιήθηκε **εκτενής ανάλυση και προτάθηκε τρόπος υπολογισμού της αβεβαιότητας** της μέτρησης της **σκληρότητας Shore A**. Από τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης προτείνεται οι μετρήσεις να γίνονται στη μεσαία περιοχή των κυαθίων, ώστε να μειώνεται, κατά το δυνατόν η αβεβαιότητα της μέτρησης. Επίσης προτείνεται:
 - α) οι μετρήσεις να γίνονται σύμφωνα με τη διαδικασία του Προτύπου ISO 48-4 [59], όσον αφορά στο πλήθος τους (δηλαδή να λαμβάνονται 5 μετρήσεις και να υπολογίζεται η μέση τιμή τους), ώστε να είναι μικρός ο χρόνος ολοκλήρωσης της μέτρησης, και τέλος β) η μέτρηση να γίνεται σε ένα κυάθιο (και όχι σε 2 ή 3 τοποθετημένα το ένα επάνω στο άλλο) ώστε να μειώνεται ο χρόνος της μέτρησης (κοπή ενός μόνο κυαθίου από το μονωτήρα) αλλά να μειώνεται και η αβεβαιότητα της μέτρησης, λαμβάνοντας φυσικά υπόψιν ότι η τιμή της σκληρότητας που θα προκύπτει από αυτή τη διαδικασία θα είναι λίγο πιο αυξημένη από την πραγματική. Με αυτόν τον τρόπο η μέτρηση αυτή μπορεί να γίνει εύκολα, με ικανοποιητική ακρίβεια και σε ελάχιστο χρόνο.
- ✓ Προτείνεται να χρησιμοποιείται η μέθοδος A του Προτύπου ISO 2781 [75] για τον υπολογισμό της **πυκνότητας** του μονωτικού περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων, λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας και στρυφνότητας της μεθόδου B, χωρίς να επηρεάζεται η εγκυρότητα της μέτρησης.
- ✓ Τα αποτελέσματα των δοκιμών: α) κεκλιμένου επιπέδου, β) φασματοσκοπίας υπέρυθρων μετασχηματισμού Fourier (FTIR) και γ) θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης (TGA) συνδυαστικά μεταξύ τους δίνουν σημαντικές πληροφορίες για την περιεκτικότητα του μονωτικού περιβλήματος στο **πληρωτικό υλικό ATH** και κατά συνέπεια για την αντοχή του στο φαινόμενο της δημιουργίας αγωγίμων καναλιών άνθρακα και διάβρωσης (**tracking and erosion**).
- ✓ Επίσης προτάθηκε και εκτελέστηκε **δοκιμή**, η οποία προσομοιώνει την **καταπόνηση** των συνθετικών μονωτήρων στο ηλεκτρικό δίκτυο από **οξέα** και κυρίως από νιτρικό οξύ (HNO₃). Προτείνεται η δημιουργία καινούριου Προτύπου για τη δοκιμή αυτή, αφού πρώτα γίνει επιπλέον έρευνα ως προς την ένταση του διαλύματος οξέος ή / και τη διάρκεια της δοκιμής, καθώς στη συγκεκριμένη διατριβή όλα τα δοκίμια από καινούριους μονωτήρες απέτυχαν.
- ✓ Σχετικά με τη **δοκιμή διάχυσης νερού** δοκιμάστηκε μια επιπλέον προσθήκη στη διαδικασία του Προτύπου IEC 62217 [151]. Συγκεκριμένα, οι μονωτήρες δοκιμάστηκαν εκτός των 12 kVac που αναφέρει το Πρότυπο και στα 18 kVac για 30 s. Τα αποτελέσματα ήταν επιτυχή για τους καινούριους συνθετικούς μονωτήρες.

Συνεπώς, προτείνεται η ενσωμάτωση στο Πρότυπο της δοκιμής στα 18 kVac για καινούριους μονωτήρες. Η συγκεκριμένη προσθήκη αυξάνει την αξιοπιστία του αποτελέσματος της δοκιμής.

- ✓ Αναφορικά με τη **δοκιμή διείσδυσης βαφής** κανένας από τους εξεταζόμενους μονωτήρες δεν έφερε 100% επιτυχία. Συνεπώς, προτείνεται να γίνει αναθεώρηση του Προτύπου IEC 62217 [151], ώστε:
 - I. είτε η δοκιμή να γίνει πιο ήπια: α) μειώνοντας τον χρόνο των 15 λεπτών, β) μειώνοντας την περιεκτικότητα του διεισδυτικού υγρού στο διάλυμα, γ) αντικαθιστώντας το διεισδυτικό υγρό με κάποιο πιο ήπιο,
 - II. είτε να μειωθεί το ποσοστό των δοκιμών που θα πρέπει να επιτύχουν από 100% σε τουλάχιστον 70%, ώστε το αποτέλεσμα της δοκιμής να είναι επιτυχές.
- ✓ Προτάθηκε επίσης και εκτελέστηκε δοκιμή που ελέγχει τη **σύνδεση της κόλλησης μεταξύ της ράβδου και του μονωτικού περιβλήματος**. Για τον συγκεκριμένο έλεγχο δεν υπάρχει κάποιο Πρότυπο παρόλο που αποτελεί σημαντική ένδειξη για την ποιότητα κατασκευής των συνθετικών μονωτήρων και για τη μεταγενέστερη αντοχή τους στις περιβαλλοντικές καταπονήσεις κατά τη λειτουργία τους στο δίκτυο. Επίσης, βρέθηκε να υπάρχει συμφωνία των αποτελεσμάτων της δοκιμής αυτής με τα αποτελέσματα της δοκιμής διάχυσης νερού σε ποσοστό 81 %.
- ✓ Σχετικά με τη **δοκιμή εφελκυσμού** των μονωτήρων ανάρτησης προτάθηκε η μεθοδολογία που περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 3.5.1.4. και επικυρώθηκε πειραματικά, μέσω της οποίας, η δοκιμή εκτελείται μέσα σε 3 λεπτά και μόνο όταν χρειάζεται σε 96 ώρες σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61109 [183]. Επίσης, προτείνεται η ενσωμάτωση αυτής της διαδικασίας στο Πρότυπο.
- ✓ Έγινε πειραματική επαλήθευση και επικύρωση της διαδικασίας που αρχικά είχε προταθεί από την πηγή [29] σχετικά με τη **δοκιμή κάμψης** (bending test) σε συνθετικούς μονωτήρες στήριξης. Πιο συγκεκριμένα, μέσω της διαδικασίας που περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 3.5.2 είναι εφικτό να γίνει επαλήθευση της παραμέτρου MDCL των συνθετικών μονωτήρων στήριξης μέσα σε 3 λεπτά σε αντίθεση με τη διαδικασία του Προτύπου IEC 61952 [193] διάρκειας 96 ωρών. Προτείνεται η ενσωμάτωση της συγκεκριμένης διαδικασίας στο Πρότυπο.
- ✓ Πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές μέτρησης της σκληρότητας Shore A και προσδιορισμού της πυκνότητας στο υλικό (HTV silicone rubber με προσμίξεις ATH) του μονωτικού περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων έπειτα από **δύο**

διαδικασίες επιταχυνόμενης γήρανσης για χρονική διάρκεια 16 ημερών. Εφαρμόστηκαν: α) τεχνητή γήρανση με βρασμό μέσα σε διάλυμα απιονισμένου νερού με 0,1% κατά βάρος χλωριούχο νάτριο (NaCl) και β) τεχνητή γήρανση με θέρμανση σε φούρνο βιομηχανικού τύπου στους 150 °C. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μέτρηση της σκληρότητας Shore A και για τις δύο περιπτώσεις τεχνητής γήρανσης έδειξαν μια ελαφριά, μη σημαντική αύξηση στις τιμές. Αντίστοιχα, οι μετρήσεις της πυκνότητας και στις δύο περιπτώσεις παρέμειναν αμετάβλητες κατά τη διάρκεια των 16 ημερών καταπόνησης.

4.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Κλείνοντας, παρουσιάζονται κάποιες προτάσεις μελλοντικής έρευνας στο θέμα της παρούσης διδακτορικής διατριβής.

Προτείνεται η βελτίωση του νευρωνικού δικτύου που υλοποιήθηκε για την αναγνώριση των κλάσεων υδροφοβικότητας σε συνθετικούς μονωτήρες. Η εκπαίδευση του μπορεί να επεκταθεί σε περισσότερες φωτογραφίες ψεκασμένων συνθετικών μονωτήρων, οι οποίοι να είναι διαφορετικής κλάσης υδροφοβικότητας ο καθένας. Έτσι, το νευρωνικό δίκτυο θα εκπαιδευτεί με πραγματικά στοιχεία, καθώς τώρα εκπαιδεύτηκε με φωτογραφίες που λήφθηκαν σε καινούριους μονωτήρες, στους οποίους δημιουργήθηκαν τεχνητά οι κλάσεις υδροφοβικότητας. Επίσης, μπορεί να δοκιμαστεί η ενσωμάτωση και η λειτουργία του σε ένα μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα (drone), το οποίο θα φέρει επίσης σύστημα ψεκασμού (δεξαμενή με απιονισμένο νερό και ελεγχόμενο ψεκαστήριο) και κάμερα. Στη συνέχεια προτείνεται η δοκιμή του συστήματος αυτού σε μονωτήρες που θα βρίσκονται σε πυλώνες και στύλους χωρίς τάση. Αν η δοκιμή αυτή επιτύχει, μπορεί να δοκιμαστεί και σε μονωτήρες σε πυλώνες / στύλους υπό τάση. Τέλος, μία ακόμα επέκταση του συστήματος αυτού θα μπορούσε να περιλαμβάνει σύστημα αυτομάτου ελέγχου το οποίο θα οδηγεί το drone να ακολουθεί μέσω τεχνητής νοημοσύνης μια γραμμή Μέσης, Υψηλής ή Υπερυψηλής Τάσης και όταν θα προσεγγίζει τους μονωτήρες θα προβαίνει σε αυτόματη επιθεώρηση τους μέσω του προαναφερθέντος νευρωνικού δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο θα είναι δυνατόν να επιθεωρούνται καλύτερα οι συνθετικοί μονωτήρες στα δίκτυα διανομής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Η μεθοδολογία της δοκιμής ελέγχου της αντοχής του μονωτικού περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων σε οξεία που παρουσιάστηκε σε αυτή τη διδακτορική διατριβή

χρήζει περαιτέρω διερεύνησης. Συγκεκριμένα, προτείνεται να ελεγχθεί η ένταση της καταπόνησης που προκαλεί στο υλικό των μονωτήρων μέσω δοκιμής διαφορετικών συγκεντρώσεων οξέος, καθώς όλοι οι καινούριοι μονωτήρες απέτυχαν κατά τη δοκιμή αυτή.

Όσον αφορά στη δοκιμή διείσδυσης βαφής, προτείνεται η διερεύνηση της έντασης της καταπόνησης που προκαλεί στη ράβδο των συνθετικών μονωτήρων, καθώς κανένας μονωτήρας δεν είχε 100% επιτυχία. Οι παράμετροι που θα πρέπει να εξεταστούν είναι η διεισδυτική βαφή, η διάρκεια της δοκιμής και το ποσοστό των δοκιμίων που πρέπει να επιτύχουν στη δοκιμή.

Επιπλέον, στις δοκιμές στις οποίες δεν υπήρξε συμπέρασμα συσχέτισης του αποτελέσματος τους με την γήρανση των συνθετικών μονωτήρων προτείνεται η εύρεση και πραγματοποίηση των δοκιμών σε περισσότερους μονωτήρες διαφορετικής ηλικίας, ώστε ένα εξακριβωθεί αν τελικά η γήρανση επηρεάζει το αποτέλεσμα. Τέτοιες δοκιμές είναι ο εφελκυσμός στο μονωτικό περίβλημα (tensile strength), η αντοχή του μονωτικού περιβλήματος σε σκίσιμο (tear strength), η δοκιμή διείσδυσης βαφής (dye penetration) και η δοκιμή σύνδεσης της ράβδου με το μονωτικό περίβλημα (adhesion test).

Επί προσθέτως, αναφορικά με τις δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης προτείνεται η περαιτέρω έρευνα, με περισσότερα δοκίμια συνθετικών μονωτήρων και καταπόνηση για περισσότερες από 16 ημέρες με περισσότερες μεθόδους τεχνητής γήρανσης (π.χ. ακτίνες UV, αλατονέφωση κλπ.). Επιπλέον, προτείνεται η εφαρμογή περισσότερων δοκιμών από τη μέτρηση σκληρότητας και πυκνότητας που εφαρμόστηκαν σε αυτή τη διατριβή.

Τέλος, προτείνεται η διερεύνηση δοκιμών και ελέγχων σε συνθετικούς μονωτήρες που θα δίνουν αποτελέσματα της ποιότητας των μονωτήρων σε πραγματικό χρόνο και χωρίς να απαιτείται η αποξήλωση τους από το ηλεκτρικό δίκτυο (online condition monitoring). Παραδείγματα τέτοιων δοκιμών θα μπορούσαν να είναι: η μέτρηση του ρεύματος διαρροής, η μέτρηση των μερικών εκκενώσεων, η θερμοσκόπηση των μονωτήρων με κάμερες ανίχνευσης υπέρυθρης ακτινοβολίας, η παρακολούθηση τους με κάμερες υπεριώδους ακτινοβολίας (για ανίχνευση του φαινομένου corona), χρήση του νερωνικού δικτύου και συστήματος ψεκασμού για την αναγνώριση της κλάσης υδροφοβικότητας. Όλα αυτά τα στοιχεία για όλους τους μονωτήρες των γραμμών του δικτύου διανομής και

μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας θα συγκεντρώνονται σε κεντρικούς υπολογιστές και θα αξιολογούνται.

Βιβλιογραφία

- [1] V.K. Agarwal, “Aging of Multistressed Polymeric Insulators”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol 24, no. 5, pp. 741-764, October 1989.
- [2] M. Amin, M. Akbar, M.N. Khan, “Aging Investigations of Polymeric Insulators: Overview and Bibliography”, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol 23, no. 4, pp. 44 - 50, July 2007.
- [3] J.F. Hall, “History and Bibliography of Polymeric Insulators for Outdoor Applications”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol 8, no. 1, pp. 376-385, January 1993.
- [4] K.O. Papailiou, F. Schmuck, “Silicone Composite Insulators Materials, Design, Applications”, Springer, 2013.
- [5] E.A. Cherney, “Non-Ceramic Insulators- A Simple Design that Requires Careful Analysis”, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol 12, no. 3, pp. 7 - 15, June 1996.
- [6] J. Mackevich, M. Shah, “Polymer outdoor insulating materials. Part I: Comparison of porcelain and polymer electrical insulation”, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol 13, no. 3, pp. 5 - 12, June 1997.
- [7] D. Pathak, M. Satwani, M. Patel, C. Patel, “The Development of Silicone Rubber Composite Insulators in Power System”, International Conference on Control, Automation, Communication and Energy Conservation, June 2009.
- [8] J. Hong, C. Hong, “Electric field analysis of 220kV composite rod insulator”, IEEE Power Engineering and Automation Conference, Wuhan, China, September 2011.
- [9] Y. Zhou, F. Wang, C. Li, H. Jiang, H. Cui, “Characteristic of field-aged 500KV composite insulators”, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Cancun, Mexico, October 2011.
- [10] J. Wang, Y. Chen, J. Liao, Z. Peng, “Voltage and E-field Distribution of UHV Composite Insulator with Connection of Porcelain Insulators”, IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), Sydney, NSW, Australia, July 2015.

- [11] Z. Qiao, L. Cheng, S. Zhang, L. Yang, “Detection of Composite Insulators Inner Defects Based on Flash Thermography”, 1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), Xi'an, China, May 2017.
- [12] R. Taherian, A. Kausar, “Electrical Conductivity in Polymer-Based Composites Experiments, Modelling, and Applications”, William Andrew, 2018.
- [13] J.S.T. Looms, “Insulators for High Voltages”, The Institution of Engineering and Technology, 2006.
- [14] E. Bauer, H. Dietz, “Porcelain and Composite Longrod Insulators - A Solution for Future Line Requirements”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol EI-16, no. 3, pp. 209-219, June 1981.
- [15] E.H. Abilgaard, E.A. Bauer, “Composite Longrod Insulators and their Influence on the Design of Overhead Lines”, International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Paris, August 25 - September 2 1976.
- [16] E. Bauer, H. Karner, K.H. Muller, P. Verma, “Service Experience with the German Composite Long Rod Insulator with Silicone - Rubber Sheds since 1967”, International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Paris, August 27 - September 4 1980.
- [17] H. Dietz, H. Karner, K.H. Muller, H. Patrunky, G. Schenk, P. Verma, H.J. Voss, “Latest Developments and Experience with Composite Longrod Insulators”, International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Paris, 27th August - 4th September 1986.
- [18] K.O. Papailiou, “Composite Insulators are Gaining Ground 25 Years of Swiss Experience”, IEEE Transmission and Distribution Conference, New Orleans, USA, 11-16 April 1999.
- [19] Working Group 22.03, “Guide for the evaluation of composite line post insulators subjected to combined mechanical loads”, Electra, no. 203, pp. 14-23, August 2002.
- [20] K.O. Papailiou, S. Thaddey, F. Schmuck, C. Armschat, J.C. Stankewitz, “Development of an 800kV HVDC station post design based on the long-term experience with composite line post insulators”, Cigre, Paris, 2010.
- [21] Working Group 22.03, “Cantilever Load Performance of Composite Line Post Insulators”, Electra, no. 169, pp. 121-127, December 1996.

- [22] S. Li, H.H. Tsang, Y. Cheng, Z. Lu, “Seismic testing and modeling of cylindrical electrical equipment with GFRP composite insulators”, *Composite Structures*, vol 194, pp. 454-467, February 2018.
- [23] M. Kikuchi, K. Takahashi, T. Yoshida, Y. Yoshitomo, T. Minagawa, P. Kishida, “Interfacial phenomena in composite hollow insulator”, 2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Montreal, QC, Canada, 14-17 October 2012.
- [24] S.M. Gubanski, A. Dernfalk, J. Andersson, H. Hillborg, “Diagnostic Methods for Outdoor Polymeric Insulators”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol 14, no. 5, pp. 1065-1080, October 2007.
- [25] H. Roh, N.D. Oliveto, A.M. Reinhorn, “Experimental test and modeling of hollow-core composite insulators”, *Nonlinear Dynamics*, vol 69, pp. 1651–1663, March 2012.
- [26] S. Epackachi, K.M. Dolatshahi, N.D. Oliveto, A.M. Reinhorn, “Mechanical behavior of electrical hollow composite post insulators: Experimental and analytical study”, *Engineering Structures*, vol 93, pp. 129-141, March 2015.
- [27] H. Zhang, Z. Jia, X. Wei, “Calculation and Analysis on Mechanical Strength of 500kV Hollow Composite Insulator with Different Types of Grooves on the Surface of End Fitting”, 2nd International Conference on Electrical Materials and Power Equipment, Guangzhou, China, April 07 - April 10 2019.
- [28] A. Suzuki, T. Kuma, A. Shinoda, M. Hidaka, R. Kishida, N. Toshima, Y. Koshin, K. Sakanishi, Y. Utsumi, “Deterioration diagnosis technique of housing rubber for composite hollow insulators”, 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Nagoya, June 1-5 2003.
- [29] 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*, vol 17, no. 2, pp. 394 - 401, April 2010.
- [30] Working Group B2.21, “Assessment of in-service Composite Insulators by using Diagnostic Tools”, *Cigre Technical Brochure 545*, August 2013.

- [31] N. Mavrikakis, K. Siderakis, D. Pylarinos, E. Koudoumas, "Assessment of Field Aged Composite Insulators Condition in Crete", 9th International Conference on Deregulated Electricity Market Issues in South Eastern Europe, Nicosia, Cyprus, 25-26 September 2014.
- [32] F. Schmuck, J. Seifert, I. Gutman, A. Pignini, "Assessment of the Condition of Overhead Line Composite Insulators", 44th CIGRE Session, 26-31 August 2012.
- [33] Working Group B2.21, "Guide for the Assessment of Composite Insulators in the Laboratory after their Removal from Service", Cigre Technical Brochure 481, December 2011.
- [34] Working Group B2.03, "Guide for The Establishment of Naturally Polluted Insulator Testing Stations", Cigre Technical Brochure 333, October 2007.
- [35] A. Phillips, "Field Guide: Visual Inspection of Polymer Insulators", EPRI, November 2015.
- [36] M. Rezaei, M.R. Shariati, S. Jabbari, "Assessment of In Service Composite Insulators in Very Harsh Coastal Environment of Iran: Laboratory & Field Testing", 21st International Conference on Electricity Distribution, 6-9 June 2011.
- [37] X. Chen, C. Li, X. Huang, L. Zhao and W. Song, "On-line Estimating the Level of Hydrophobicity of Composite Insulators Using the Digital Images", Proceedings - Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo., Indianapolis, pp. 216-221, 2005.
- [38] IEC TS 62073, "Guidance on the measurement of hydrophobicity of insulator surfaces", Ed. 2.0, 2016.
- [39] D. Thomazini, M.V. Gelfuso, R.A.C. Altafim, "Hydrophobicity Classification of Polymeric Materials Based on Fractal Dimension", Materials Research, vol 11, no. 4, pp. 415-419, November 2008.
- [40] L. Yang, J. Bi, Y. Hao, L. Nian, Z. Zhou, L. Li, Y. Liao, F. Zhang, "A Recognition Method of the Hydrophobicity Class of Composite Insulators Based on Features Optimization and Experimental Verification", Energies, vol 11, no. 4, March 2018.
- [41] Q. Sun, F. Lin, W. Yan, F. Wang, S. Chen, L. Zhong, "Estimation of the Hydrophobicity of a Composite Insulator Based on an Improved Probabilistic Neural Network", Energies, vol 11, no. 9, September 2018.

- [42] R. Jayabal, K. Vijayarekha, R. S. Kumar, "Design of ANFIS for Hydrophobicity Classification of Polymeric Insulators with Two-Stage Feature Reduction Technique and its Field Deployment", *Energies*, vol 11, no. 12, December 2018.
- [43] Q. Wang, Y. Huang, X. Mo, W. Lai, H. Dong, Y. Yang, J. Liu, J. Huang, Y. Sun, "The Study of the Improved Multilayer Perceptron Algorithm on Hydrophobicity Detection Research of Composite Insulator Bushing", 8th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, pp. 438-441, 2016.
- [44] I. Jarrar, K. Assaleh, A.H.El-Hag, "Utilizing digital image processing techniques to evaluate the condition of non-ceramic insulators", International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA'15), pp. 1-4, 2015.
- [45] Z. Dong, Y. Fang, X. Wang, Y. Zhao, Q. Wang, "Hydrophobicity Classification of Polymeric Insulators Based on Embedded Methods", *Materials Research*, vol 18, no. 1, pp. 127-137, January 2015.
- [46] I. Jarrar, K. Assaleh, A.H.El-Hag, "Using a Pattern Recognition-Based Technique to Assess the Hydrophobicity Class of Silicone Rubber Materials", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol 21, no. 6, pp. 2611-2618, December 2014.
- [47] L. Zhao, C. Li, J. Xiong, S. Zhang, J. Yao, X. Chen, "Online Hydrophobicity Measurement for Silicone Rubber Insulators on Transmission Lines", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol 24, no. 2, pp. 806-813, April 2009.
- [48] F. Schmuck, "Quantification of Hydrophobicity", *INMR*, April 2019.
- [49] Working Group D1.14, "Evaluation of Dynamic Hydrophobicity Properties of Polymeric Materials for Non-Ceramic Outdoor Insulation Retention and Transfer of Hydrophobicity", *Cigre Technical Brochure 442*, December 2010.
- [50] S. Li, X. Liang, Y. Gao, Y. Liu, Y. Yin, Z. Li, "A Modified 5000 h Test Procedure for Silicone Rubber Insulator Based on Contamination and Hydrophobicity Change Simulation", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol 24, no. 3, pp. 1818 - 1828, June 2017.

- [51] M. Amin, M. Akbar, S. Amin, “Hydrophobicity of silicone rubber used for outdoor insulation (An overview)”, *Reviews on advanced materials science*, vol 16, no. 1, December 2007.
- [52] M.T. Nazir, J. Xingliang, S. Akram, “Laboratory Investigation on Hydrophobicity of New Silicon Rubber Insulator under Different Environmental Conditions”, *International Journal of Electrical & Computer Sciences IJECS-IJENS*, vol 12, no. 3, June 2012.
- [53] R. Barsch, J. Lambrecht, H. Jahn, “On the evaluation of the hydrophobicity of composite insulator surfaces”, *Proceedings of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena - CEIDP '96*, October 1996.
- [54] J. Wang, G. Wang, Y. Zhao, “Effect of UV Radiation and Leakage Current on Hydrophobicity of RTV Silicone Rubber”, *Advanced Materials Research*, vol 704, pp. 185-188, June 2013.
- [55] X. Wang, X. Liang, Y. Zhou, “Aging effect of UV radiation on SIR insulators’ hydrophobicity property”, *2004 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, USA*, 20 October 2004.
- [56] M.K. Bhagyashree, K.L. Shivabasappa, S. Raavichandran, S. Kumar, “Study of HTV Silicone Rubber with Different Concentrations of Filler ATH”, *International Journal on Emerging Technologies*, vol 6, no. 2, pp. 72-78, 2015.
- [57] X. Wang, X. Hong, P. Chen, C. Zhao, Z. Jia, L. Wang, L. Zou, “Surface Hardness Analysis of Aged Composite Insulators via Laser-Induced Plasma Spectra Characterization”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol 47, no. 1, pp. 387-394, January 2019.
- [58] H. Zhao, D. Allanson, X.J. Ren, “Use of Shore Hardness Tests for In-Process Properties Estimation/Monitoring of Silicone Rubbers”, *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, vol 3, pp. 142-147, July 2015.
- [59] ISO 48-4, Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of hardness — Part 4: Indentation hardness by durometer method (Shore hardness), Ed. 1.0, 2018.
- [60] ISO 23529, Rubber - General procedures for preparing and conditioning test pieces for physical test methods, Ed. 3.0, 2016.

- [61] A. Siddiqui, M. Braden, M.P. Patel, S. Parker, “An experimental and theoretical study of the effect of sample thickness on the Shore hardness of elastomers”, *Dental Materials*, vol 26, no. 6, pp. 560-564, June 2010.
- [62] J. Grasaesom, S. Thong-om, W. Payakcho, B. Marungsri, “Ageing Deterioration of Silicone Rubber Polymer Insulator under Salt Water Dip Wheel Test”, *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol 5, no. 8, pp. 940-946, 2011.
- [63] M. Akbar, R. Ullah, I. Qazi, “Multi-stress aging investigations of HTV silicone rubber filled with Silica ATH composites for HVAC and HVDC transmission”, *Engineering Failure Analysis*, vol 110, March 2020.
- [64] J. Grasaesom, S. Thong-Om, W. Payakcho, A. Oonsivilaiand, B. Marungsri, “Comparison of Ageing Deterioration of Silicone Rubber Outdoor Polymer Insulator under Salt Water Dip Wheel Test”, *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, vol 5, no. 12, pp. 1891-1898, 2011.
- [65] M. Rezaei, M.R. Shariati, S. Jabbari, “Assessment of In Service Composite Insulators in Very Harsh Coastal Environment of Iran: Laboratory & Field Testing”, *21st International Conference on Electricity Distribution*, no. 1266, June 2011.
- [66] Z. Wang, X. Zhang, F. Wang, X. Lan, Y. Zhou, “Effects of aging on the structural, mechanical, and thermal properties of the silicone rubber current transformer insulation bushing for a 500 kV substation”, *Springerplus*, vol 5, no. 790, June 2016.
- [67] Z. Chen, Z. Rao, C. Lin, C. Chen, Z. Jia, H. Lu, Z. Yang, “Non-destructive Condition Assessment of silicone rubber composite insulators”, *2014 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, pp. 494-497, October 2014.
- [68] S.Thong-Om, W. Payakcho, J. Grasaesom, A. Oonsivilaiand, B. Marungsri, “Comparison Ageing Deterioration of Silicone Rubber Outdoor Polymer Insulators in Artificial Accelerated Salt Fog Ageing Test”, *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, vol 5, no. 12, pp. 1096-1105, 2011.

- [69] M.K. Moghadam, M. Taheri, S. Gharazi, M. Keramati, M. Bahrami, N. Riahi, “A Study of Composite Insulator Aging Using the Tracking Wheel Test”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol 23, no. 3, pp. 1805-1811, June 2016.
- [70] X. Huang, H. Gao, W. Cao, Y. Tian, W. Yang, Z. Yuan, “Study on Ultraviolet Aging Properties of High Polymer Composite Insulators”, 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD) Conference, September 2018.
- [71] 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*, vol 774, no. 5, pp. 396-404, February 2019.
- [72] S. Thong-Om, W. Payakcho, J. Grasaesom, A. Oonsivilaiand, B. Marungsri, “Comparison of Ageing Deterioration of Silicone Rubber Housing Material for Outdoor Polymer Insulators”, *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, vol 5, no. 12, pp. 1137-1144, 2011.
- [73] J. Song, Z. Huang, Y. Qin, X. Li, “Thermal Decomposition and Ceramifying Process of Ceramifiable Silicone Rubber Composite with Hydrated Zinc Borate”, *Materials*, vol 12, no. 10, May 2019.
- [74] X.-W. Zhao, C.-G. Zang, Y.-L. Sun, Y.-L. Zhang, Y.-Q. Wen, Q.-J. Jiao, “Effect of hybrid hollow microspheres on thermal insulation performance and mechanical properties of silicone rubber composites”, *Journal of Applied Polymer Science*, vol 135, no. 11, November 2017.
- [75] ISO 2781, Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of density, Ed. 5.0, 2018.
- [76] R. Brown, “Physical Test Methods for Elastomers”, Springer, 2018.
- [77] ISO 1183-2, Plastics — Methods for determining the density of non-cellular plastics — Part 2: Density gradient column method, Ed. 2.0, 2019.
- [78] R. Brown, “Physical Testing of Rubber”, Springer, 2006.
- [79] Rapra Technology Limited, R. Brown, “Handbook of Polymer Testing”, Rapra Technology Limited, 2002.

- [80] Κ.Ο. Παπαηλιού, “Τα μυστικά των σύνθετων μονωτήρων σιλικόνης”, Παρουσίαση Cigre, 2017.
- [81] N. Mavrikakis, K. Siderakis, P.N. Mikropoulos, “Laboratory Investigation on Hydrophobicity and Tracking performance of Field Aged Composite Insulators”, 2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2-5 September 2014.
- [82] B.S. Reddy, A.R. Verma, D.S. Prasad, “Surface Erosion Studies on Polymer Insulators Used for High Voltage Transmission”, International Journal of Plasma Environmental Science & Technology, vol 10, no. 2, pp. 121-124, December 2016.
- [83] R.A. Ghunem, “Using the Inclined-Plane Test to Evaluate the Resistance of Outdoor Polymer Insulating Materials to Electrical Tracking and Erosion”, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol 31, no. 5, pp. 16-22, Sept.-Oct. 2015.
- [84] IEC 60587, Electrical insulating materials used under severe ambient conditions - Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion, Ed. 3.0, 2007.
- [85] F. Schmuck, “Investigating Polymeric Housings Using the Inclined Plane Test”, INMR, February 2019.
- [86] A. Krivda, L.E. Schmidt, X. Kornmann, H. Ghorbani, A. Ghorbandaeipour, M. Eriksson, H. Hillborg, “Inclined-Plane Tracking and Erosion Test According to the IEC 60587 Standard”, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol 25, no. 6, pp. 14-22, November 2009.
- [87] S. Ansorge, F. Schmuck, K.O. Papailiou, “Improved Silicone Rubbers for the Use as Housing Material in Composite Insulators”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol 19, no. 1, pp. 209-217, February 2012.
- [88] S. Patel, R.R. Patel, “Electrical Characterization of Polymeric Insulators Using HVAC Tests”, International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering, vol 4, no. 5, pp. 164-167, May 2016.
- [89] R.A. Ghunem, S.H. Jayaram, E.A. Cherney, “Erosion of Silicone Rubber Composites in the AC and DC Inclined Plane Tests”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol 20, no. 1, pp. 229-236, February 2013.

- [90] S.F. Kaaiye, C. Nyamupangedengu, “Comparative study of AC and DC inclined plane tests on silicone rubber (SiR) insulation”, *IET*, vol 2, no. 2, pp. 119-128, June 2017.
- [91] E.A. Cherney, R.S. Gorur, A. Krivda, S.H. Jayaram, S.M. Rowland, S. Li, M. Marzinotto, R.A. Ghunem, I. Ramirez, “DC Inclined-Plane Tracking and Erosion Test of Insulating Materials”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol 22, no. 1, pp. 211-217, February 2015.
- [92] G.P. Bruce, S.M. Rowland, A. Krivda, “Performance of Silicone Rubber in DC Inclined Plane Tracking Tests”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol 17, no. 2, pp. 521-532, April 2010.
- [93] ISO 37, Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of tensile stress-strain properties, Ed.6.0, 2017.
- [94] J. Shi, H. Dong, Y. Quan, C. Chen, S. Yan, “Evaluation of thermoplastic polyolefin materials for the hard shed of composite insulators”, *Journal of Applied Polymer Science*, vol 137, no. 36, February 2020.
- [95] L. Cheng, H. Mei, L. Wang, Z. Guan, F. Zhang, “Research on Aging Evaluation and Remaining Lifespan Prediction of Composite Insulators in High Temperature and Humidity Regions”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol 23, no. 5, pp. 2850 - 2857, November 2016.
- [96] Y. Xue, X. Li, D. Zhang, H. Wang, Y. Chen, Y. Chen, “Comparison of ATH and SiO₂ fillers filled silicone rubber composites for HTV insulators”, *Composites Science and Technology*, vol 155, pp. 137-143, December 2017.
- [97] Y. Liao, Y. Weng, J. Wang, H. Zhou, J. Lin, S. He, “Silicone Rubber Composites with High Breakdown Strength and Low Dielectric Loss Based on Polydopamine Coated Mica”, *Polymers MDPI*, vol 11, no. 12, November 2019.
- [98] M. Ehsani, H. Borsi, E. Gockenbach, J. Morshedian, G.R. Bakhshandeh, “An investigation of dynamic mechanical, thermal, and electrical properties of housing materials for outdoor polymeric insulators”, *European Polymer Journal*, vol 40, no. 11, pp. 2495-2503, November 2004.
- [99] A. Rashid, M. Amin, M. Ali, A. Khattak, J. Saleem, “Fabrication, characterization and aging influence on characteristics of high temperature vulcanized silicone

rubber/silica hybrid composites for high voltage insulation”, *Materials Research Express*, vol 6, no. 10, August 2019.

- [100] R. Chakraborty, S. Reddy B, “Studies on High Temperature Vulcanized Silicone Rubber Insulators under Arid Climatic Aging”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol 24, no. 3, pp. 1751-1760, June 2017.
- [101] S. Nandi, B.S. Reddy, D. Sharma, “Performance of Composite Insulators Used for Electric Transmission under Extreme Climatic Conditions”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol 28, no. 10, pp. 5959–5969, October 2019.
- [102] J. Liu, X. Zhang, X. Lu, A. Lin, X. Li, Z. Zhang, “Improving mechanical properties of silicone rubber for use as outdoor insulator sheds by manipulating matrix-filler interfacial compatibility”, *Materials Research Express*, vol 6, no. 10, September 2019.
- [103] B. Sun, Z. Du, H. Cao, L. Du, W. Yu, “Oxidation-grafting surface modification of waste silicone rubber composite insulator powder: Characterizations and properties of EPDM/modified waste powder composites”, *Journal of Applied Polymer Science*, vol 134, no. 42, November 2017.
- [104] ISO 34-1, Rubber, vulcanized or thermoplastic - Determination of tear strength - Part 1: Trouser, angle and crescent test pieces, Ed. 4.0, 2015.
- [105] L. Yang, W. Jianguo, Z. Mi, F. Chunhua, Z. Wenjun, “Research on the Silicone Rubber Sheds Performance of Composite Insulator”, 2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application, November 9-13 2008.
- [106] Z. Zhu, Z. Jia, G. Ma, X. Wang, Y. Lei, Z. Guan, “Fatigue Fracture of Composite Insulator Sheds Utilized in Strong Wind Areas”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol 22, no. 3, pp. 1636-1643, June 2015.
- [107] W. Xilin, Z. Zhengyi, M. Guoxiang, J. Zhidong, G. Zhicheng, “Shed Tearing on Composite Insulators in Service Areas with High Wind”, *INMR*, April 2017.
- [108] N.C. Mavrikakis, P.N. Mikropoulos, K. Siderakis, I. Pellas, E. Thalassinakis, “Evaluation of the Damage Caused by Bird Pecking Activity along Composite High Voltage Insulators”, 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Athens, Greece, 10-13 September 2018.

- [109] S. Kobayashi, Y. Matsuzaki, Y. Arashitani, R. Kimata, “Development of Composite Insulators for Overhead Lines (Part 2)”, *Furukawa Review*, no. 21, pp. 56-61, 2002.
- [110] H. Yin, T. Cui, G. Wu, X. Meng, “Experimental Research on Operation Characteristics of 500kV AC Composite Insulators”, 2010 International Conference on Power System Technology, 24-28 October 2010.
- [111] R. Cardoso, A.C. Balestro, A. Dellallibera, E.C.M. Costa, J.M.G. Angelini, L.H.I. Mei, “Silicone insulators of power transmission lines with a variable inorganic load concentration: Electrical and physiochemical analyses”, *Measurement*, vol 50, pp. 63-73, April 2014.
- [112] Z. Weigang, Z. Yidong, L. Wenjuan, W. Lulu, W. Fei, “Deterioration Factor analysis of Composite Insulators based on Experiment and Mathematical Statistics”, *Advances in Engineering Research (AER)*, vol 143, pp. 365-370, 2017.
- [113] Working Group D1.27, “Fingerprinting of Polymeric Insulating Materials for outdoor use”, *Cigre Technical Brochure 595*, October 2014.
- [114] M. Amin, M. Akbar, M. Salman, “Composite insulators and their aging: An overview”, *Science in China Series E: Technological Sciences*, vol 50, pp. 697–713, December 2007.
- [115] Y. Xiong, S.M. Rowland, J. Robertson, R.J. Day, “Surface Analysis of Asymmetrically Aged 400 kV Silicone Rubber Composite Insulators”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol 15, no. 3, pp. 763-770, June 2008.
- [116] S.M. Rowland, J. Robertson, Y. Xiong, 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, no. 2, pp. 375-383, April 2010.
- [117] C. Xie, Y. Zhang, J. Wang, Y. Hao, M. Gao, Y. Liu, “Research on Evaluation Method of Composite Insulators Aging”, *Proceedings of the 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, July 19-23 2009.

- [118] L. Cheng, S. Shao, S. Zhang, R. Liao, L. Yang, C. Guo, “Research on the long-time operation performance of composite insulator shed hydrophobicity under hydrothermal conditions”, *IET*, vol 3, no. 1, pp. 67-72, March 2018.
- [119] X. Liang, W. Bao, Y. Gao, “Decay-like Fracture Mechanism of Silicone Rubber Composite Insulator”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol 25, no. 1, pp. 110-119, February 2018.
- [120] A.R. Chughtai, D.M. Smith, L.S. Kumosa, M. Kumosa, “FTIR Analysis of Non-ceramic Composite Insulators”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol 11, no. 4, pp. 585-596, August 2004.
- [121] ISO 11358-1, *Plastics - Thermogravimetry (TG) of polymers - Part 1: General principles*, Ed. 1.0, 2014.
- [122] Y. Li, C. Chen, Z. Jia, W. Ye, “Thermal stability and organic component analysis of HTV silicone rubber composite insulator”, *2015 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 18-21 October 2015.
- [123] C. Chen, Z. Jia, W. Ye, Z. Guan, “Condition Assessment Strategies of Composite Insulator Based on Statistic Methods”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol 23, no. 6, pp. 3231 - 3241, December 2016.
- [124] A.H.El-Hag, S.H. Jayaram, E.A. Cherney, “Comparison between Silicone Rubber containing Micro- and Nano- Size Silica Fillers”, *2004 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, October 2004.
- [125] X. Peng, Z. Wang, H. Lin, P. Fang, Z. Huang, “Surface Structure of Aged Composite Insulator Studied by Slow Positron Beam”, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, vol 34, pp. 1008–1012, October 2019.
- [126] Y. Gao, X. Liang, Y. Liu, W. Bao, S. Li, C. Wu, “Effect of electrical stress on glass fiber reinforced polymer used in high voltage composite insulator under wet environment”, *Composites Science and Technology*, vol 155, pp. 151-159, February 2018.
- [127] IEC 61006, *Electrical insulating materials - Methods of test for the determination of the glass transition temperature*, Ed. 2.0, 2004.
- [128] K.L. Chrzan, “Inclined Plane Test, Influence of Transformer Power”, *Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering*, 2009.

- [129] S. Schumann, M. Döring, F. Lehretz, J. Görlich, “Thermal Behavior and Resistance against Electrical Discharges of Modified Silicones for Outdoor Applications”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol 25, no. 2, pp. 464-475, April 2018.
- [130] S. Ansorge, F. Schmuck, K.O. Papailiou, “Impact of different Fillers and Filler Treatments on the Erosion Suppression Mechanism of Silicone Rubber for Use as Outdoor Insulation Material”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol 22, no. 2, pp. 979-989, April 2015.
- [131] IEC 61621, Dry, solid insulating materials – Resistance test to high-voltage, low-current arc discharges, Ed.1.0, 1997.
- [132] A.D. Germano, “Influence of Fillers on Silicone Elastomers for Outdoor Insulation”, PhD at Technische Universität München, 2015.
- [133] IEC TR 62039, Selection guidelines for polymeric materials for outdoor use under HV stress, Ed. 2.0, 2021.
- [134] R. Inoue, T. Kondo, M. Kozako, M. Hikita, “Effects of Tracking and Erosion Resistance of Nano-Boehmite Added Silicone Rubber”, 2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), 11-15 September 2017.
- [135] A.D. Germano, J.M. Seifert, J. Kindersberger, “Influence of Nanosilica on the Performance of HTV Silicone Rubber for Outdoor Insulation”, Materials Science, 2013.
- [136] L. Jing, C. Ruimin, L. Chunyao, “The arc resistance of binary filled silicone rubber”, 2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 20-23 October 2013.
- [137] S. Kühnel, S. Kornhuber, R. Bärsch, J. Lambrecht, “On the arc-resistance when tested with DC- and AC-stress by the example of silicone elastomers”, 2016 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 16-19 October 2016.
- [138] S. Kuehnel, S. Kornhuber, J. Lambrecht, “On the Electrical Characteristic and Heat Dissipation of High Voltage Surface Arcs”, 2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 21-24 October 2018.

- [139] A. Skopec, L. Moron, P. Zylka, “Time-domain Temperature Variations of a Composite Insulator Surface Exposed to Arc Discharges”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol 11, no. 2, pp. 369-377, April 2004.
- [140] M. Volk, S. Arreguin, P. Ermanni, J. Wong, C. Bär, F. Schmuck, “Pultruded Thermoplastic Composites for High Voltage Insulator Applications”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol 27, no. 4, pp. 1280-1287, August 2020.
- [141] I. Umeda, K. Tanaka, T. Kondo, K. Kondo, Y. Suzuki, “Acid Aging of Silicone Rubber Housing for Polymer Insulators”, Proceedings of 2008 International Symposium on Electrical Insulating Materials, September 7-11 2008.
- [142] A.J. Phillips, D.J. Childs, H.M. Schneider, “Aging of Non-Ceramic Insulators due to Corona from Water Drops”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol 14, no. 3, pp. 1081-1089, July 1999.
- [143] N.R. Shingne, S.J. Barot, U.N. Puntambekar, S.H. Chetwani, J.M. Thakkar, S. Shah, A. Sadaria, “Analysis of 400 kV Failed Silicone Rubber Insulators: Role of Micro-Cracks in Glass Fiber Rod and Electric Field Distribution in Failure Mechanism – Case Study”, Cigre e-session 2020, Paris, September 2020.
- [144] B.S. Reddy, S. Prasad D, “Effect of Coldfog on the Corona Induced Degradation of Silicone Rubber Samples”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol 22, no. 3, pp. 1711-1718, June 2015.
- [145] B. Ma, J. Andersson, S.M. Gubanski, “Evaluating Resistance of Polymeric Materials for Outdoor Applications to Corona and Ozone”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol 17, no. 2, pp. 555-565, April 2010.
- [146] V.M. Moreno, R.S. Gorur, “Impact of Corona on the Long-Term Performance of Nonceramic Insulators”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol 10, no. 1, pp. 80-95, February 2003.
- [147] A.N. Jahromi, E.A. Cherney, S.H. Jayaram, L.C. Simon, “Aging Characteristics of RTV Silicone Rubber Insulator Coatings”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol 15, no. 2, pp. 444-452, April 2008.

- [148] X. Wang, S. Kumagai, N. Yoshimura, “Contamination Performances of Silicone Rubber Insulator Subjected to Acid Rain”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol 5, no. 6, pp. 909-916, December 1998.
- [149] K. Naito, S. Nishiwaki, R. Matsuoka, H. Shinokubo, “Investigation Results of Silicone Rubber Insulators under Wet and Contaminated Conditions”, *Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, July 3-8 1994.
- [150] Y. Gao, X. Liang, W. Bao, S. Li, C. Wu, Y. Liu, Y. Cai, “Effects of Liquids Immersion and Drying on the Surface Properties of HTV Silicone Rubber: Part I- Contact Angle and Surface Chemical Properties”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol 24, no. 6, pp. 3594-3602, December 2017.
- [151] IEC 62217, Polymeric HV insulators for indoor and outdoor use – General definitions, test methods and acceptance criteria, Ed. 2.0, 2012.
- [152] L. Cheng, L. Wang, Z. Zhang, F. Zhang, “Mechanism of fracture related heating for 500-kV composite insulators in highly humid areas”, *INTERNATIONAL TRANSACTIONS ON ELECTRICAL ENERGY SYSTEMS*, vol 26, pp. 641–654, June 2015.
- [153] S.P. Kuruvilla, N.M. Renukappa, J.S. Rajan, “Development of Epoxy with Nano and Micro Fillers for Core Insulation of Composite Insulators”, *2019 International Conference on High Voltage Engineering and Technology (ICHVET)*, February 2019.
- [154] S.P. Kuruvilla, N.M. Renukappa, “Effects of Nano- and Micro-Filler on Water Diffusion and Leakage Current of GRP Composites”, In book: *Innovative Design, Analysis and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering (I-DAD 2018)*, pp. 53-61, January 2019.
- [155] P. Kadlec, J. Pihera, P. Prosr, T. Džugan, P. Totzauer, J. Hornak, T. Kroupa, H. Zemčík, R. Pavlica, P. Sedláčková, J. Komárek, “Evaluation of Structure Influence Within the Context of Water Diffusion and Surface Current of Glass Reinforced Polymer Composites for HV Insulation”, *Proceedings of the 21st International Symposium on High Voltage Engineering*, pp. 203-210, 2019.

- [156] D. Armentrout, M. Kumosa, L. Kumosa, “Water Diffusion into and Electrical Testing of Composite Insulator GRP Rods”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol 11, no. 3, pp. 506-522, June 2004.
- [157] B. Lutz, L. Cheng, Z. Guan, L. Wang, “Analysis of a Fractured 500 kV Composite Insulator – Identification of Aging Mechanisms and their Causes”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol 19, no. 5, pp. 1723-1731, October 2012.
- [158] L. Cheng, L. Wang, Z. Guan, F. Zhang, “Research on aged interfaces of composite insulators after extended water diffusion tests”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol 23, no. 6, pp. 3676-3682, December 2016.
- [159] I. Gutman, A. Dernfalk, P. Sidenvall, J. Lundengård, “New Test to Reveal Level of Core/Housing Adhesion for Composite Insulators”, Proceedings of the 21st International Symposium on High Voltage Engineering, vol 2, pp. 139-149, October 2019.
- [160] T. Wang, F. Zhang, X. Zeng, Y. Liao, J. Yin, S. Zhang, “Performance Analysis of Composite Insulators”, 2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC), September 2019.
- [161] Z. Zhang, F. Yin, L. Wang, H. Mei, “Improved Current Sensor for Water Diffusion Testing of Composite Insulators”, Sensors, MDPI, vol 19, no. 4, February 2019.
- [162] T. Mączka, G. Paściak, A. Jarski, M. Piątek, “Analysis of the possibilities of using dielectric foam in the construction of composite high voltage post-insulators”, IOP Conference Series Materials Science and Engineering, vol 113, no. 1, February 2016.
- [163] S. Wright, D. Dumora, “Design Criteria for Composite Insulators”, IEE Colloquium on Non-Ceramic Insulators for Overhead Lines, October 1992.
- [164] Y. Zhu, L. He, S. Zhou, D. Zhang, J. Fang, “Insulation Performance of Rigid Polyurethane Foam and Its Application in Station Post Insulator”, 2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), 20-24 May 2018.

- [165] CEI IEC 61109, Composite insulators for a.c. overhead lines with a nominal voltage greater than 1 000 V – Definitions, test methods and acceptance criteria, Ed. 1.0, 1992.
- [166] B. Hill, V. Sklenicka, F. Schmuck, “On behalf of CIGRE WG B2.21: investigation of different liquid solutions for dye penetration tests used in standard IEC 62217 for design and routine testing”, ELEKTRA, 2010.
- [167] T. Wang, F. Zhang, X. Zeng, Y. Liao, S. Zhang, H. Huang, X. Ma, Q. Lv, X. Mao, R. Xie, “Study on Microstructure of Composite Insulator Rod”, 2020 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 22 June - 3 July 2020.
- [168] Q. Zhang, T. Yuan, W. Wu, Y. Cai, L. Tang, “The research about the principle of Interface aging between Housing and Core of Composite Insulators”, 2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED 2016), 10 - 13 August 2016.
- [169] H. Liu, T. Yang, C. Zhou, R. Jia, Y. Zhang, Z. Qi, “Analysis of 500kV composite insulator fracture fault”, Journal of Physics: Conference Series the Third International Conference on Mechanical, Electric and Industrial Engineering, vol 1633, 23 - 25 May 2020.
- [170] M. Kumosa, L. Kumosa, D. Armentrout, “Failure Analyses of Nonceramic Insulators: Part II—The Brittle Fracture Model and Failure Prevention”, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol 21, no. 4, pp. 28 - 41, August 2005.
- [171] Independent Insulation Group, “Project: Quality composite insulators”, STRI, presentation, March 2020.
- [172] I. Gutman, A. Dernfalk, P. Sidenvall, “Testing Level of Adhesion Between Fiberglass Rod & Housing in Composite Insulators”, INMR, March 2018.
- [173] I. Gutman, J. Lundengård, C. Ahlrot, “Need of Standardized Adhesion Test for Composite Insulators: Lessons Learned from Service Experience and Testing”, The 20th International Symposium on High Voltage Engineering, Buenos Aires, Argentina, August 27 – September 01 2017.
- [174] I. Gutman, A. Dernfalk, P. Sidenvall, J. Lundengård, C. Ahlrot, P. Aparicio, A. Berlin, T. Condon, J.-F. Goffinet, K. Halsan, et al., “Rod to Housing Adhesion in

Composite Insulators: Practical Evaluation in Collaboration with Utilities”, INMR World Congress, Presentation, 20-23 October 2019.

- [175] I. Gutman, A. Dernfalk, P. Sidenvall, J. Lundengård, C. Ahlrot, P. Aparicio, A. Berlin, T. Condon, J.-F. Goffinet, K. Halsan, et al., “Rod to Housing Adhesion in Composite Insulators: Practical Evaluation in Collaboration with Utilities”, INMR World Congress, 20-23 October 2019.
- [176] B. Weining, G. Yanfeng, L. Shaohua, L. Xidong, W. Jiafu, “Study on the Interface Partial Discharge between Silicone Rubber and Fiber Reinforced Plastic in Composite Insulators”, 2015 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2015.
- [177] D. Pylarinos, I. Pellas, “Investigation of an Insulator Flashunder in an 150 kV OTL of the Power System of Crete”, Engineering, Technology & Applied Science Research, vol 9, no. 5, pp. 4851-4858, 2019.
- [178] S. Kobayashi, Y. Matsuzaki, H. Masuya, Y. Arashitani, R. Kimata, “Development of Composite Insulators for Overhead Lines”, 2020.
- [179] I. Gutman, A. Dernfalk, P. Sidenvall, “Testing Adhesion Between Fiberglass Rod & Housing in Composite Insulators”, INMR, December 2018.
- [180] IEC 60794-1-22:2017, Optical fibre cables - Part 1-22: Generic specification - Basic optical cable test procedures - Environmental test methods, October, 2017.
- [181] S. Zhang, C. Guo, L. Cheng, H. Wang, R. Liao, “Testing Method for Composite Insulators Interface Based on Nonlinear Ultrasonic”, IEEE Access, vol 7, pp. 83111 - 83119, June 2019.
- [182] C. Yuan, C. Xie, L. Li, F. Zhang, S.M. Gubanski, “Ultrasonic Phased Array Detection of Internal Defects in Composite Insulators”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol 23, no. 1, pp. 525-531, February 2016.
- [183] 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. 2.0, 2008.
- [184] I.Y. Al-Hamoudi, Z.M. Al-Hamouz, “Reliability and Cost Effectiveness of Silicone Rubber Insulators in The Eastern Coastal Industrial Area of Saudi Arabia”, 2003

IEEE 10th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, 6 - 10 April 2003.

- [185] A. Prenleloup, T. Gmur, J. Botsis, K.O. Papailiou, “Acoustic emission study and strength analysis of crimped steel-composite joints under traction”, *Composite Structures*, vol 74, pp. 370-378, June 2005.
- [186] C. Turreil, R. Roberge, P. Bourdon, “Long-Term Mechanical Properties of High Voltage Composite Insulators”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol PAS-104, no. 10, pp. 2918-2921, October 1985.
- [187] M. Kumosa, Y. Han, L. Kumosa, “Analyses of composite insulators with crimped end-fittings: Part I—non linear finite element computations”, *Composites Science and Technology*, vol 62, pp. 1191-1207, March 2002.
- [188] M. Kumosa, D. Armentrout, L. Kumosa, Y. Han, S.H. Carpenter, “Analyses of composite insulators with crimped end-fittings: part II—Suitable crimping conditions”, *Composites Science and Technology*, vol 62, pp. 1209-1221, March 2002.
- [189] F. Ju, L. Xidong, Y. Yu, W. Chengsheng, C. Ling, “Application of Acoustic Emission Technology on Structure Design and Quality Control of Composite Insulators”, *Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, June 21 -26 2000.
- [190] J. Wankowicz, J. Bielecki, “Models of the Long-term Mechanical Strength of Long Rod Composite Insulators”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol 17, no. 2, pp. 360-367, April 2010.
- [191] A.C. Baker, R.A. Bernstorff, E.A. Cherney, R. Christman, R.S. Gorur, R.J. Hill, Z. Lodi, S. Marra, D.G. Powell, A.E. Schwalm, et al., “High-Voltage Insulators Mechanical Load Limits—Part II: Standards and Recommendations”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol 27, no. 4, pp. 2342-2349, October 2012.
- [192] R.J. Hill, “The effect of High Temperature Conductors on Composite Suspension Insulator performance”, *IEEE PES General Meeting*, 25-29 July 2010.
- [193] 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. 2.0, 2008.

- [194] A.C. Baker, R.A. Bernstorff, E.A. Cherney, R. Christman, R.S. Gorur, R.J. Hill, Z. Lodi, S. Marra, D.G. Powell, A.E. Schwalm, et al., “High Voltage Insulators Mechanical Load Limits—Part I: Overhead Line Load and Strength Requirements”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol 27, no. 3, pp. 1106-1115, July 2012.
- [195] A. Preneloup, T. Gmür, J. Botsis, K.O. Papailiou, K. Obrist, “Stress and failure analysis of crimped metal–composite joints used in electrical insulators subjected to bending”, *Composites: Part A*, vol 40, no. 5, pp. 644-652, May 2009.
- [196] D. Dumora, D. Feldmann, M. Gaudry, “Mechanical Behavior of Flexurally Stressed Composite Insulators”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol 5, no. 2, pp. 1066-1073, April 1990.
- [197] Cigre Working Group 22.03, Study Committee 22, “Dynamic Bending Tests of Composite line Post Insulators”, *Electra*, no. 192, pp. 36-45, October 2000.
- [198] P. Bonhote, T. Gmur, J. Botsis, K.O. Papailiou, “Stress and damage analysis of composite–aluminium joints used in electrical insulators subject to traction and bending”, *Composite Structures*, vol 64, no. 3-4, pp. 359-367, June 2004.
- [199] M. Kumosa, L. Kumosa, D. Armentrout, “Failure Analyses of Nonceramic Insulators Part 1: Brittle Fracture Characteristics”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol 21, no. 3, pp. 14-27, May-June 2005.
- [200] M. Kuhl, “FRP Rods for Brittle Fracture Resistant Composite Insulators”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol 8, no. 2, pp. 182-190, April 2001.
- [201] K. Kamo, T. Nakanishi, Y. Hayashi, R. Matsuoka, “Reproducing Tests of Brittle Fractures of Polymer Insulators”, *Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, June 21-26 2000.
- [202] S.H. Carpenter, M. Kumosa, “An investigation of brittle fracture of composite insulator rods in an acid environment with either static or cyclic loading”, *Journal of Materials Science*, vol 35, no. 17, pp. 4465-4476, September 2000.
- [203] X. Liang, J. Dai, “Analysis of the Acid Sources of a Field Brittle Fractured Composite Insulator”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol 13, no. 4, pp. 870-876, August 2006.

- [204] C. Tourreil, F. Schmuck, on behalf of Working Group B2.03, “Brittle Fractures of Composite Insulators – Failure Mode Chemistry, Influence of Resin Variations and Search for a Simple Insulator Core Evaluation Test Method”, *Electra*, no. 215, pp. 17-23, August 2004.
- [205] M. Kumosa, L. Kumosa, D. Armentrout, “Can Water Cause Brittle Fracture Failures of Composite Non-ceramic Insulators in the Absence of Electric Fields?”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol 11, no. 3, pp. 523-533, June 2004.
- [206] J. Montesinos, R.S. Gorur, B. Mobasher, D. Kingsbury, “Mechanism of Brittle Fracture in Nonceramic Insulators”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol 9, no. 2, pp. 236-243, April 2002.
- [207] Working Group D1.14, “MATERIAL PROPERTIES FOR NON-CERAMIC OUTDOOR INSULATION”, *Cigre Technical Brochure 255*, August 2004.
- [208] ENEL Group distribution companies, “GSCC010 Composite Insulators for Medium Voltage Lines”, Rev. 02, April 2019.
- [209] M. Megel, L. Kumosa, T. Ely, D. Armentrout, M. Kumosa, “Initiation of stress-corrosion cracking in unidirectional glass/polymer composite materials”, *Composites Science and Technology*, vol 61, no. 2, pp. 231-246, February 2001.
- [210] L. Kumosa, M. Kumosa, D. Armentrout, “Resistance to Brittle Fracture of Glass Reinforced Polymer Composites Used in Composite (Nonceramic) Insulators”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol 20, no. 4, pp. 2657-2666, October 2005.
- [211] L. Kumosa, M. Kumosa, D. Armentrout, “Resistance to stress corrosion cracking of unidirectional ECR-glass/polymer composites for high voltage composite insulator applications”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol 34, no. 1, pp. 1-15, January 2003.
- [212] D. Armentrout, M. Kumosa, T. McQuarrie, “Boron-Free Fibers for Prevention of Acid Induced Brittle Fracture of Composite Insulator GRP Rods”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol 18, no. 3, pp. 684-693, July 2003.
- [213] K. Σιδεράκης, “Διερεύνηση της συμπεριφοράς μονωτήρων πορσελάνης και υλικών RTV SIR σε πραγματικές και εργαστηριακές συνθήκες με μετρήσεις του ρεύματος διαρροής”, *Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών*, Δεκέμβριος 2006.

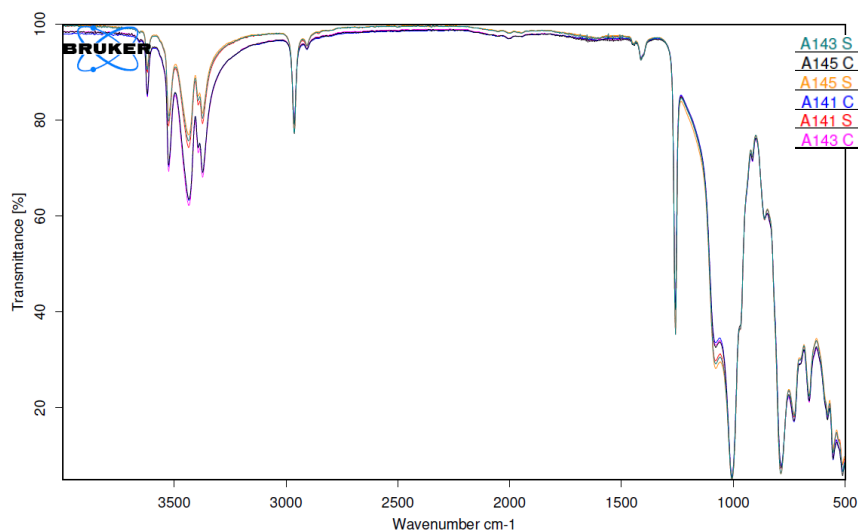
- [214] Β. Κονταργύρη, “Συμβολή στη μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς ρυπασμένων μονωτήρων”, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (Ε.Μ.Π.), Δεκέμβριος 2007.
- [215] Λ. Λαζαρίδης, “Επιφανειακή διηλεκτρική αντοχή μονωτικών υλικών σε ανομοιογενές ηλεκτρικό πεδίο υπό κρουστικές υψηλές τάσεις: επίδραση της υγρασίας”, Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (Α.Π.Θ.), Ιούνιος 2010.
- [216] Δ. Πυλαρινός, “Διερεύνηση συμπεριφοράς μονωτήρων υψηλής τάσης μέσω μετρήσεων του ρεύματος διαρροής”, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2012.
- [217] Ν. Μαυρικάκης, “Διερεύνηση των μηχανισμών γήρανσης συνθετικών μονωτήρων υπαιθρίου χώρου”, Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (Α.Π.Θ.), 2019.
- [218] Τεχνική Περιγραφή ΔΕΗ ΔΔ – 204/20.11.2008, “Συνθετικοί μονωτήρες ανάρτησης και στήριξης”, Νοέμβριος 2008.
- [219] C.C. Kokalis, T. Tasakos, V.T. Kontargyri, G. Siolas, I.F. Gonos, C.A. Christodoulou, K.O. Papailiou, “Hydrophobicity Classification of Composite Insulators Using Convolutional Neural Networks (B2-119)”, CIGRE 2020 e-session, 24 August - 3 September, 2020.
- [220] C.C.A. Kokalis, T. Tasakos, V.T. Kontargyri, G. Siolas and I.F. Gonos, “Hydrophobicity classification of composite insulators based on convolutional neural networks”, Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 91, 2020.
- [221] J. Deng, W. Dong, R. Socher, L.-J. Li, K. Li and L. Fei-Fei, “ImageNet: A large-scale hierarchical image database”, 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 20-25 June 2009.
- [222] Γ.Α.Ν. Μαρούλη, “Πεδιακή Ανάλυση Συνθετικών Μονωτήρων Μέσης Τάσης”, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Νοέμβριος 2021.
- [223] C.C.A. Kokalis, V.T. Kontargyri and I.F. Gonos, “A Proposal for the Evaluation of HTV Silicone Rubber Composite Insulators”, Polymers, 13(21), 3610, 2021.
- [224] C.C.A. Kokalis, V.T. Kontargyri, T. Tasakos and I.F. Gonos, “Quality Tests on Field Aged Composite Insulators of Hellenic Electricity Distribution Network”,

2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 6 - 10 September, 2020.

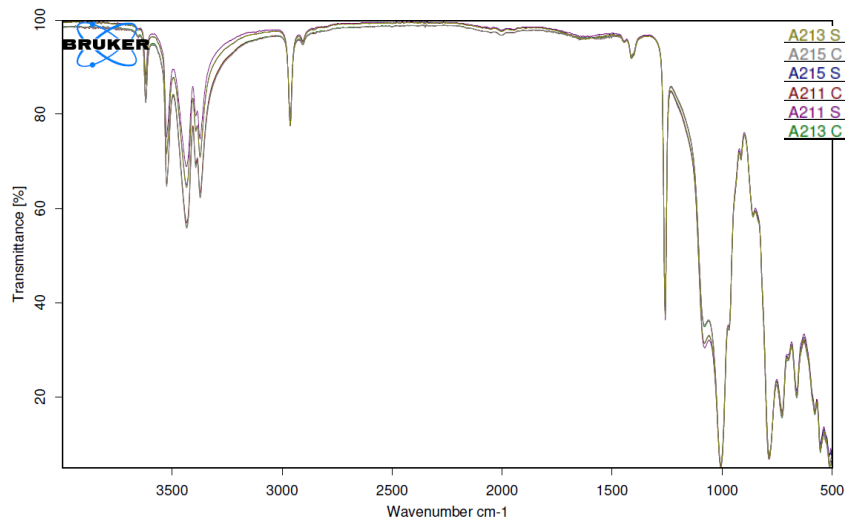
- [225] Γ.Μ. Ρουσόπουλος, “Δοκιμές Σκληρότητας σε Συνθετικούς Μονωτήρες Μέσης Τάσης”, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2021.
- [226] C.C.A. Kokalis, V.T. Kontargyri, I.F. Gonos, K.O. Papailiou, A. Anagnostou and M. Champakis, “Intensified Quality Assurance Tests on Medium Voltage Composite Insulators”, 30th CIGRE Greece National Conference "e-Session 2020", 26 November, 2020.
- [227] UKAS M3003: “The expression of Uncertainty and Confidence in Measurement”, United Kingdom Accreditation Service (UKAS), Ed. 4, 2019.
- [228] ISO GUIDE 98-3, “Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)”, Ed. 1, 2008.
- [229] F.E. Jones and G.L. Harris, “ITS-90 Density of Water Formulation for Volumetric Standards Calibration”, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, vol. 97, no. 3, pp. 335–340, May-June 1992.
- [230] Κ.Δ. Γιασαφάκης, “ Οπτική Επιθεώρηση, Δοκιμή Υδροφοβικότητας & Μέτρηση Πυκνότητας σε Συνθετικούς Μονωτήρες Μέσης Τάσης”, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 2021.
- [231] C.C.A. Kokalis, C.D. Giasafakis, V.T. Kontargyri and I.F. Gonos, “Hydrophobicity and Density Measurements on New and Field Aged Medium Voltage Composite Insulators”, 22nd International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), 25 November, 2021.
- [232] Ε.Γ.Ο. Κατσαΐτης Βασιλείου, “ Προσομοίωση της δοκιμής κεκλιμένου επιπέδου συνθετικών μονωτήρων με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων”, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Νοέμβριος 2021.

Παράρτημα Α

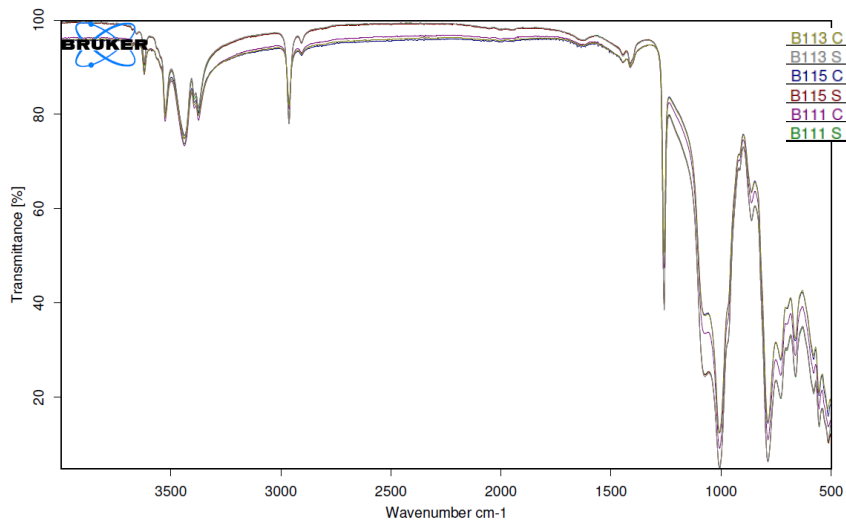
Σε αυτό το παράρτημα παρατίθενται τα διαγράμματα (φάσματα) που λήφθηκαν κατά τη δοκιμή της φασματοσκοπίας υπερόθρων μετασχηματισμού Fourier (FTIR). Πιο συγκεκριμένα, **για τους καινούριους μονωτήρες** παρατίθενται τα διαγράμματα από τις δοκιμές που έγιναν με δοκίμια από: α) την επιφάνεια του υλικού (συμβολίζεται στα διαγράμματα με «S» από την αγγλική λέξη Surface), αφού είχε καθαριστεί πρώτα με ισοπροπυλική αλκοόλη και β) από το εσωτερικό του υλικού (συμβολίζεται στα διαγράμματα με «C» από την αγγλική λέξη Core) (σε κοινό διάγραμμα) και **για τους μεταχειρισμένους** παρατίθενται διαγράμματα από τις δοκιμές με δοκίμια από: α) την επιφάνεια του υλικού όπως ήταν χωρίς να γίνει καθαρισμός της ρύπανσης από αυτήν (συμβολίζεται στα διαγράμματα με «P» από την αγγλική λέξη Pollution), β) από την επιφάνεια του υλικού αφού προηγήθηκε καθαρισμός της ρύπανσης με ισοπροπυλική αλκοόλη (συμβολίζεται στα διαγράμματα με «S» από την αγγλική λέξη Surface) και γ) από το εσωτερικό του (συμβολίζεται στα διαγράμματα με «C» από την αγγλική λέξη Core). Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων αυτών ελήφθησαν 3 δοκίμια «S» και 3 δοκίμια «C» (για λόγους επαναληψιμότητας) από έναν καινούριο μονωτήρα από κάθε κατασκευαστή και από κάθε τύπο και 3 δοκίμια «P», 3 δοκίμια «S» και 3 δοκίμια «C» από έναν μεταχειρισμένο μονωτήρα από κάθε χρωματική ομάδα των πινάκων 3-5 και 3-6. Τα διαγράμματα διαπερατότητας (φάσματα) του υλικού συναρτήσει του κυματαριθμού που προέκυψαν από αυτές τις δοκιμές φαίνονται στα σχήματα A-1 έως και A-38.



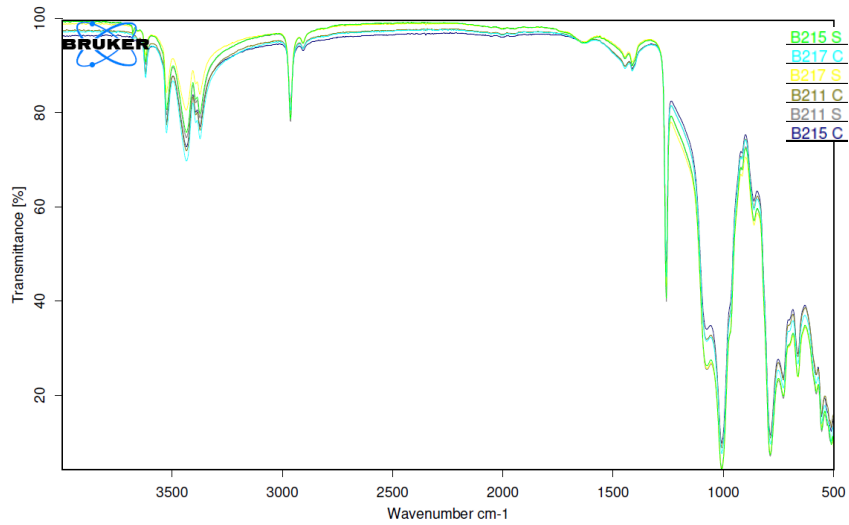
Σχήμα Α - 1. Φάσμα FTIR για μονωτήρα A1 (δοκίμια «S» και «C»).



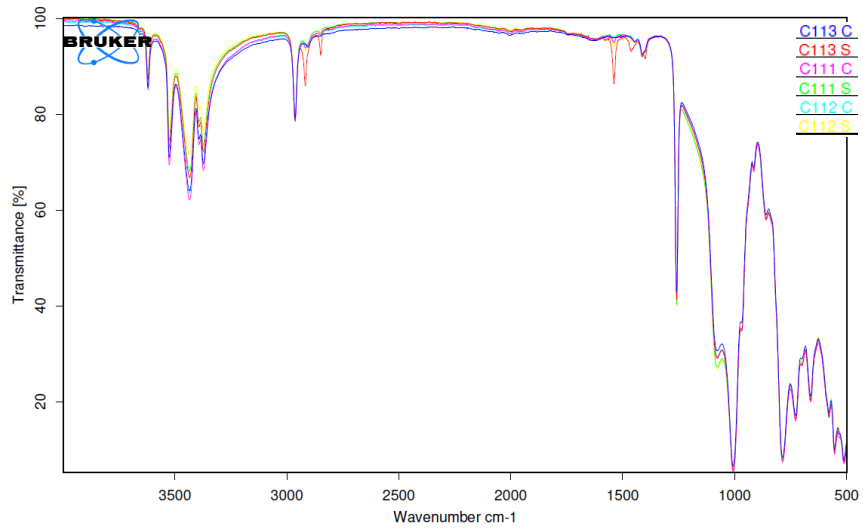
Σχήμα Α - 2. Φάσμα FTIR για μονωτήρα Α2 (δοκίμια «S» και «C»).



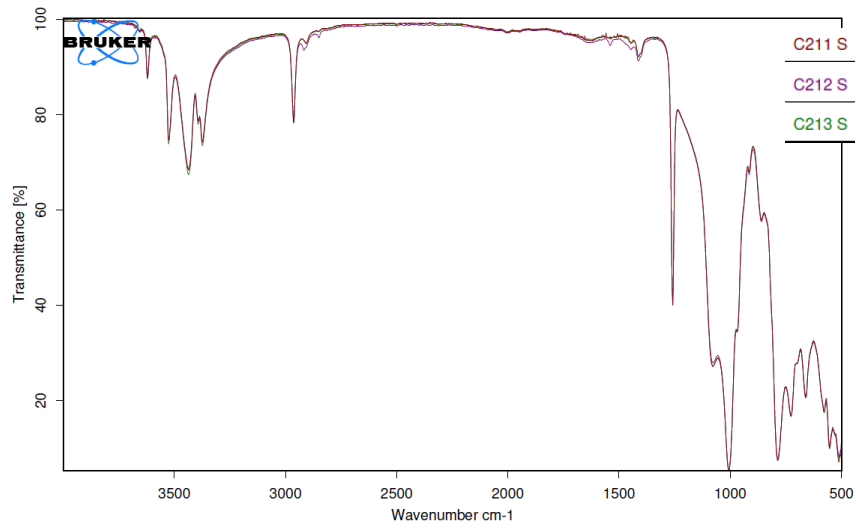
Σχήμα Α - 3. Φάσμα FTIR για μονωτήρα Β1 (δοκίμια «S» και «C»).



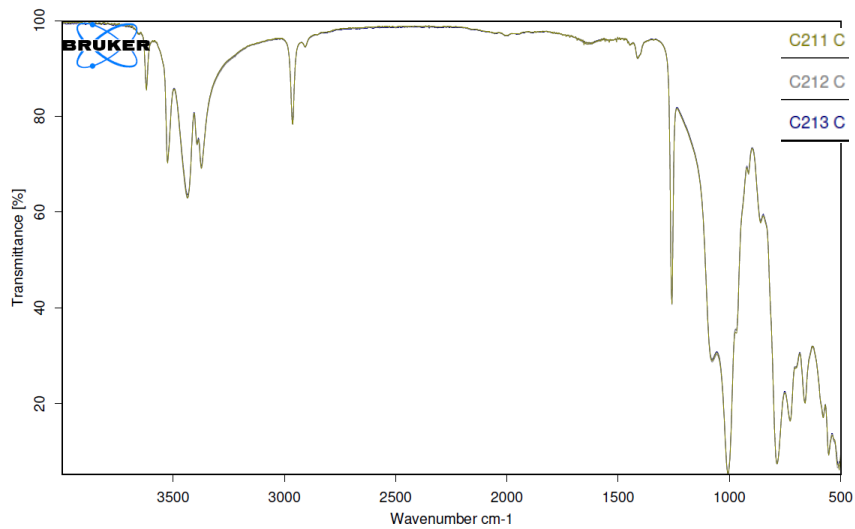
Σχήμα Α - 4. Φάσμα FTIR για μονωτήρα Β2 (δοκίμια «S» και «C»).



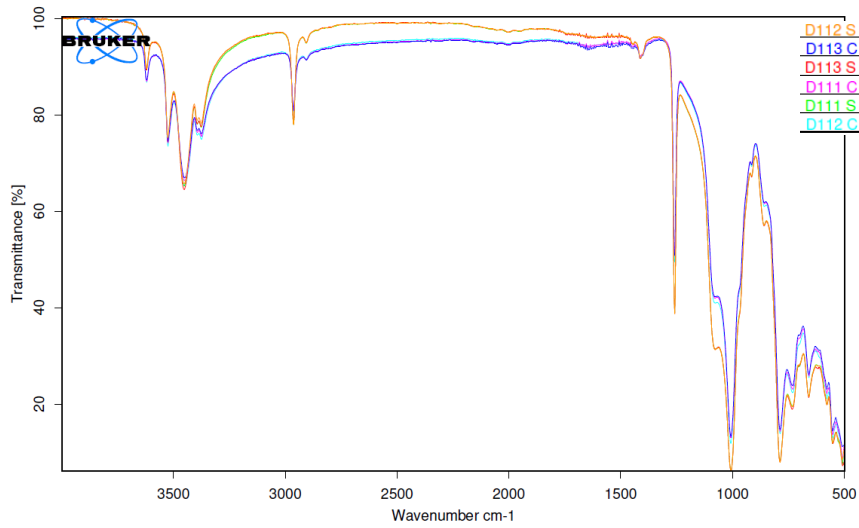
Σχήμα Α - 5. Φάσμα FTIR για μονωτήρα C1 (δοκίμια «S» και «C»).



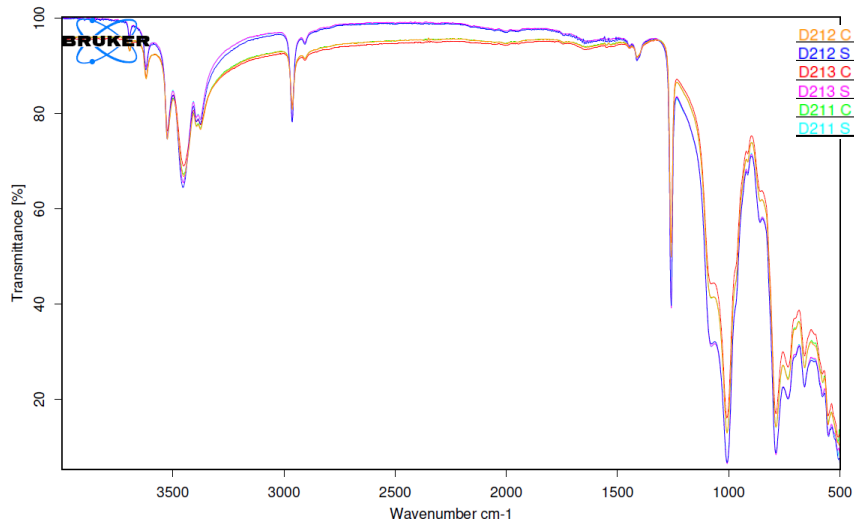
Σχήμα Α - 6. Φάσμα FTIR για μονωτήρα C2 (δοκίμια «S»).



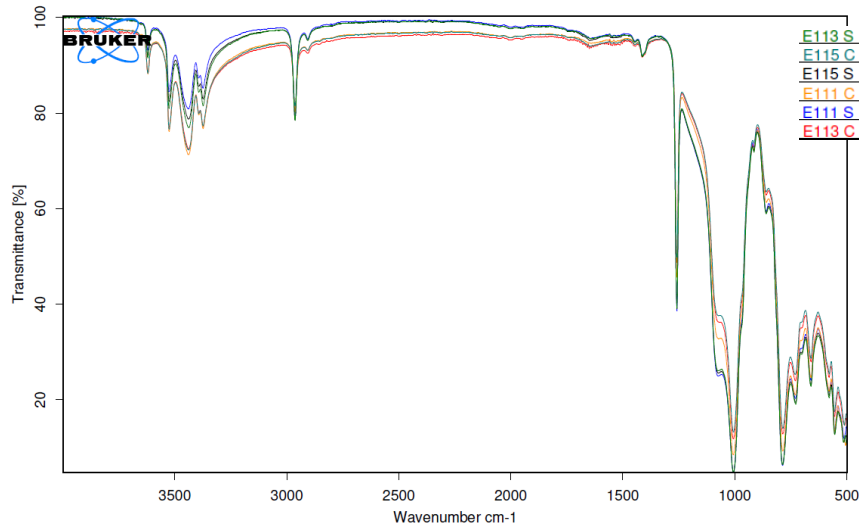
Σχήμα Α - 7. Φάσμα FTIR για μονωτήρα C2 (δοκίμια «C»).



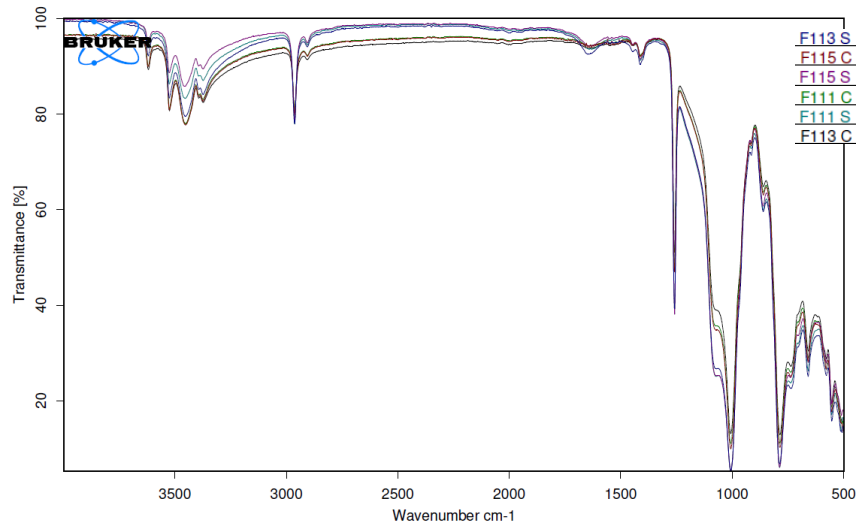
Σχήμα Α - 8. Φάσμα FTIR για μονωτήρα D1 (δοκίμια «S» και «C»).



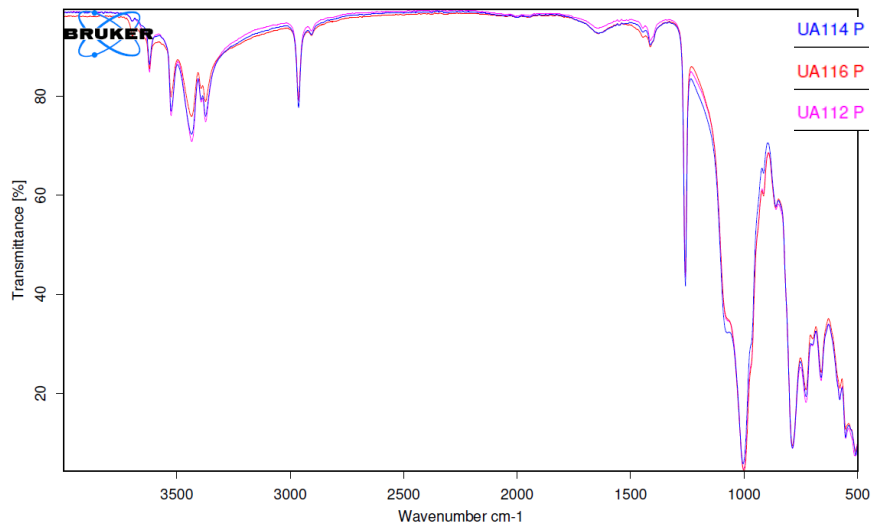
Σχήμα Α - 9. Φάσμα FTIR για μονωτήρα D2 (δοκίμια «S» και «C»).



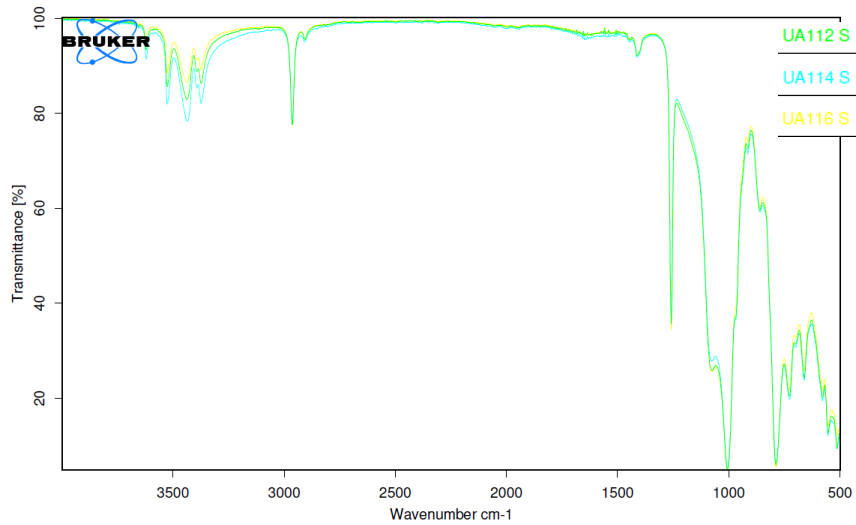
Σχήμα Α - 10. Φάσμα FTIR για μονωτήρα E1 (δοκίμια «S» και «C»).



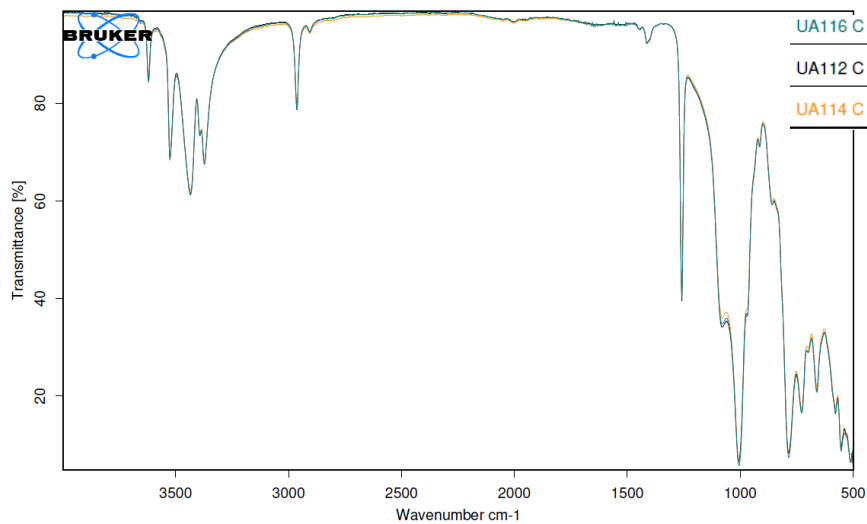
Σχήμα Α - 11. Φάσμα FTIR για μονωτήρα F1 (δοκίμια «S» και «C»).



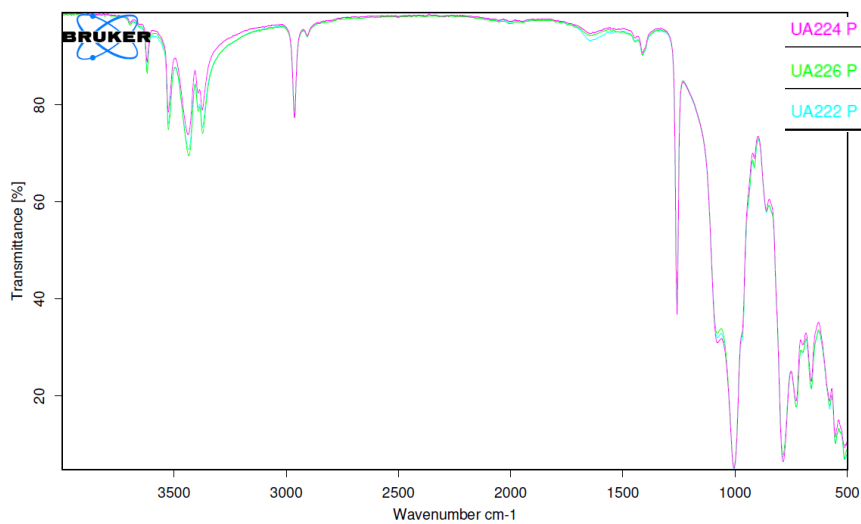
Σχήμα Α - 12. Φάσμα FTIR για το μονωτήρα UA11 (δοκίμια «P»).



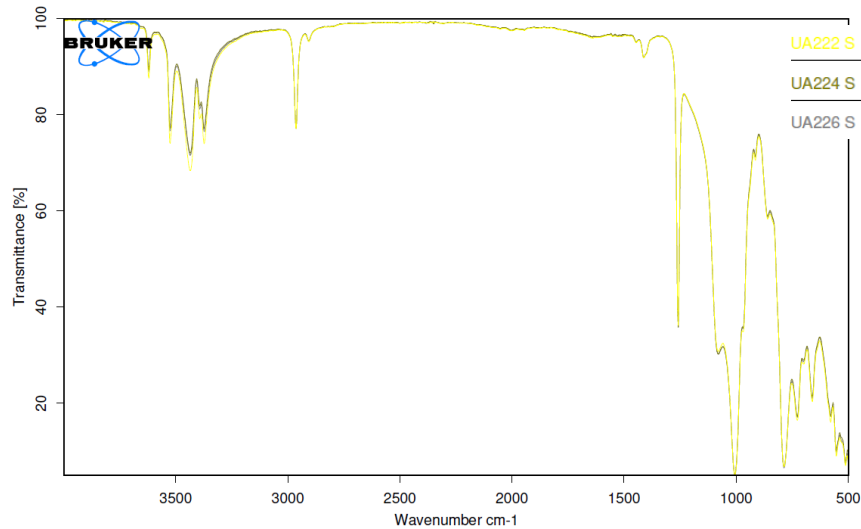
Σχήμα Α - 13. Φάσμα FTIR για το μονωτήρα UA11 (δοκίμια «S»).



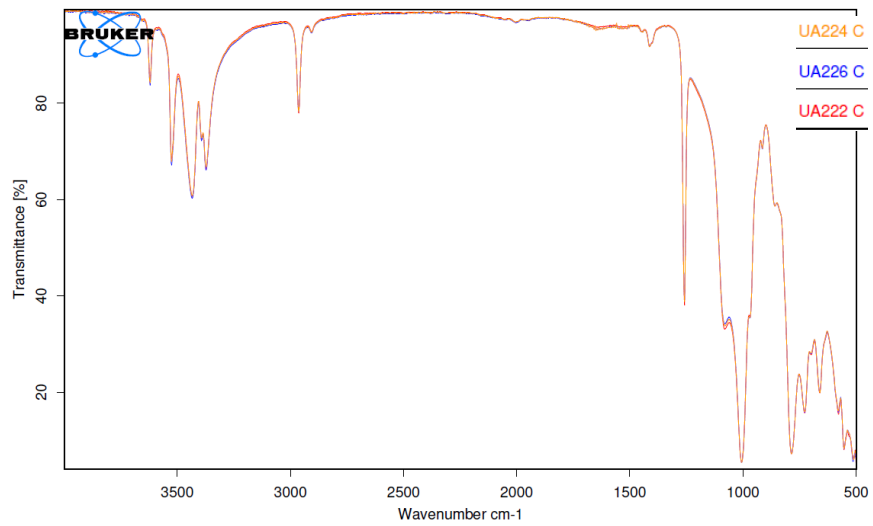
Σχήμα Α - 14. Φάσμα FTIR για το μονωτήρα UA11 (δοκίμια «C»).



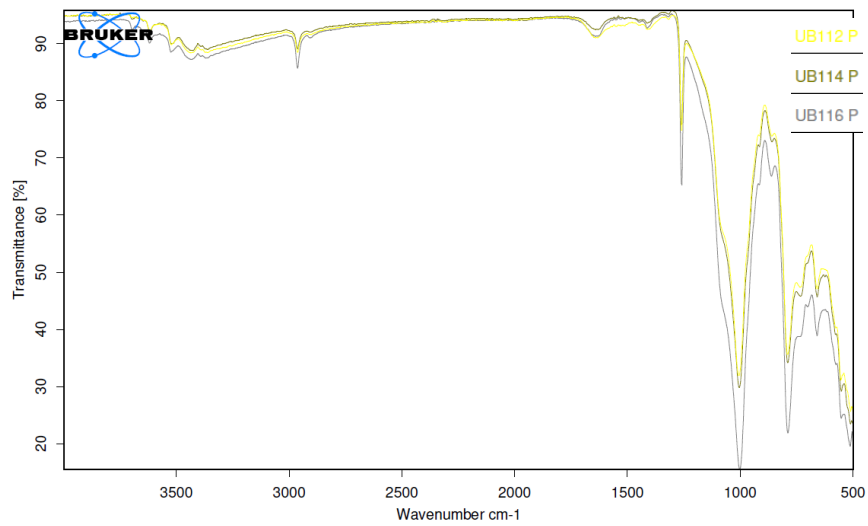
Σχήμα Α - 15. Φάσμα FTIR για μονωτήρα UA22 (δοκίμια «P»).



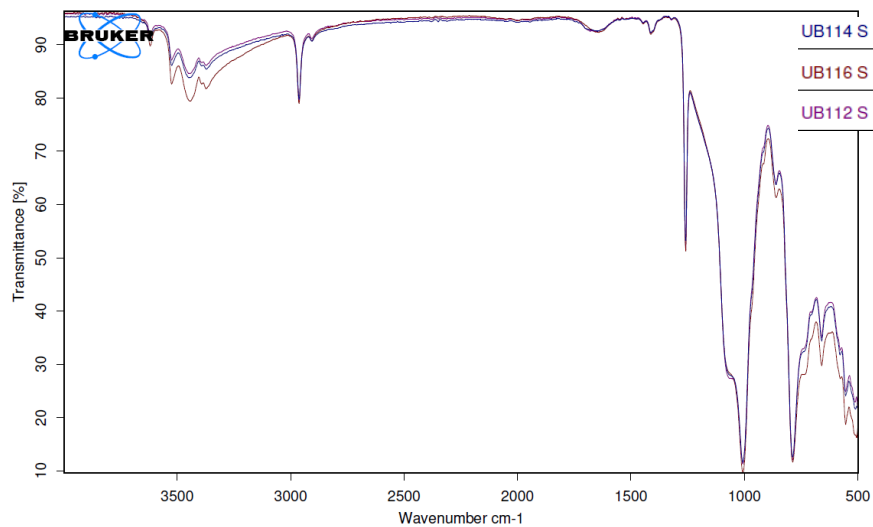
Σχήμα Α - 16. Φάσμα FTIR για το μονωτήρα UA22 (δοκίμια «S»).



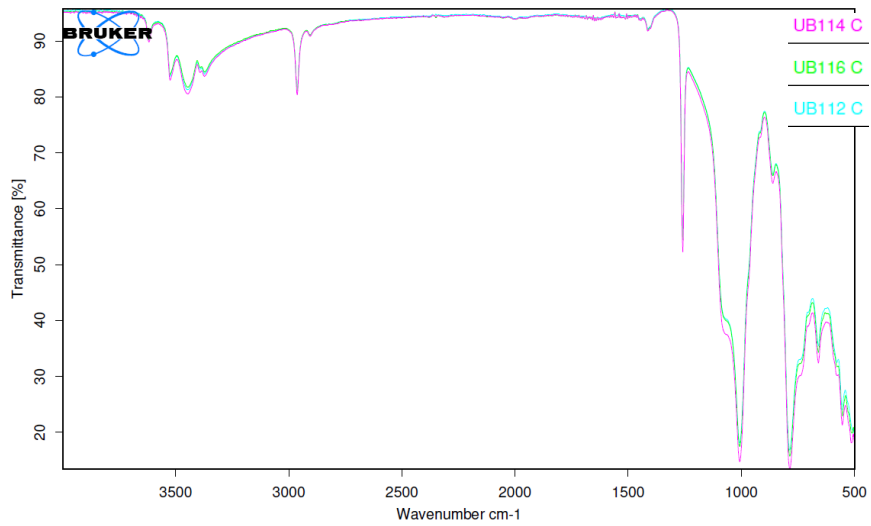
Σχήμα Α - 17. Φάσμα FTIR για το μονωτήρα UA22 (δοκίμια «C»).



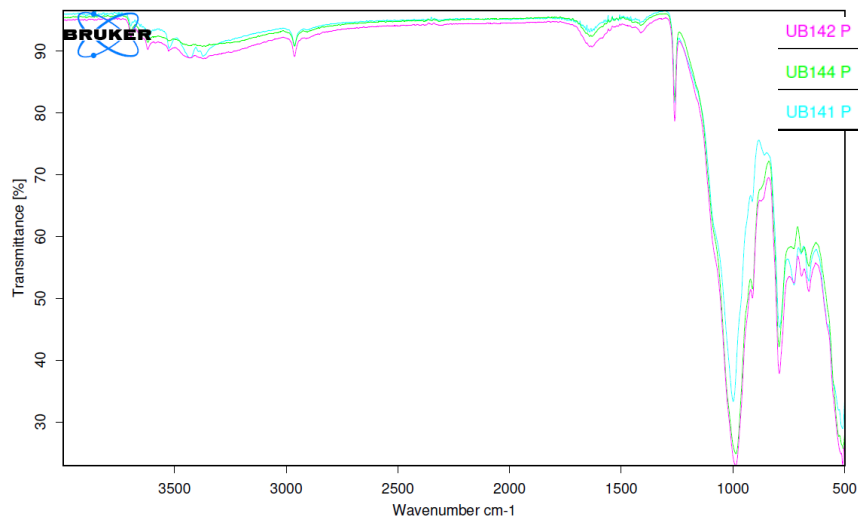
Σχήμα Α - 18. Φάσμα FTIR για μονωτήρα UB11 (δοκίμια «P»).



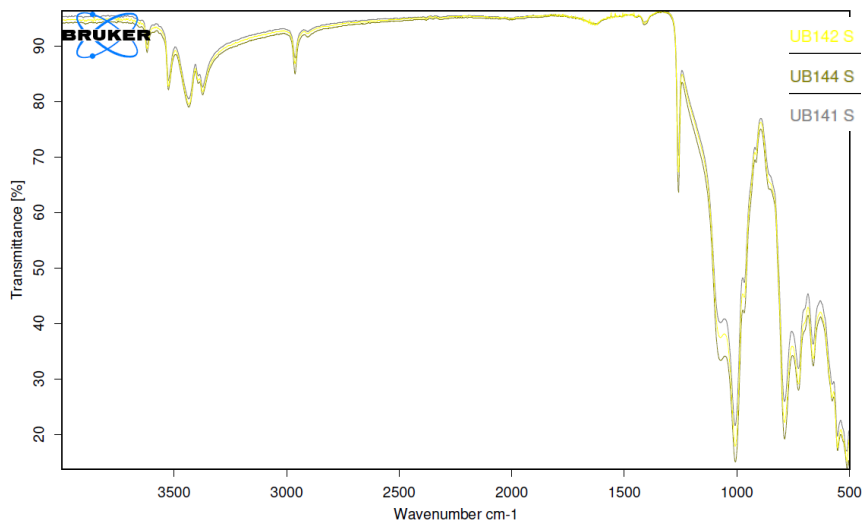
Σχήμα Α - 19. Φάσμα FTIR για το μονωτήρα UB11 (δοκίμια «S»).



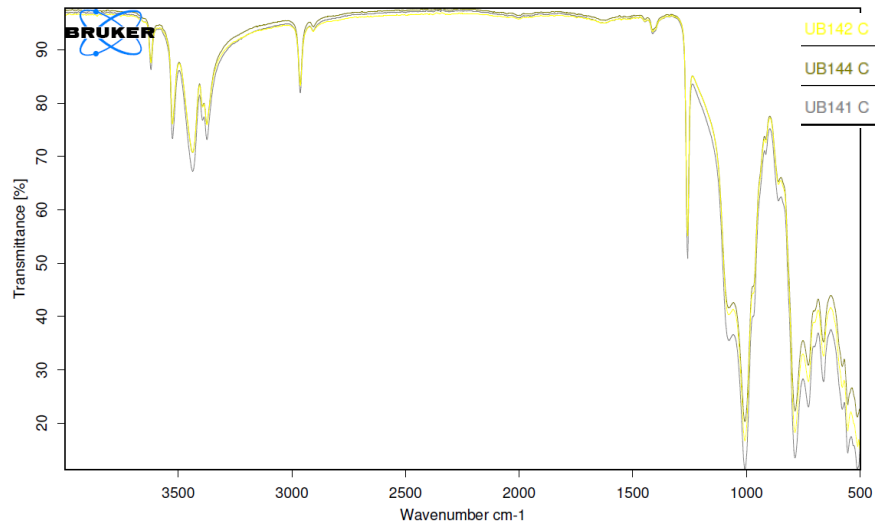
Σχήμα Α - 20. Φάσμα FTIR για το μονωτήρα UB11 (δοκίμια «C»).



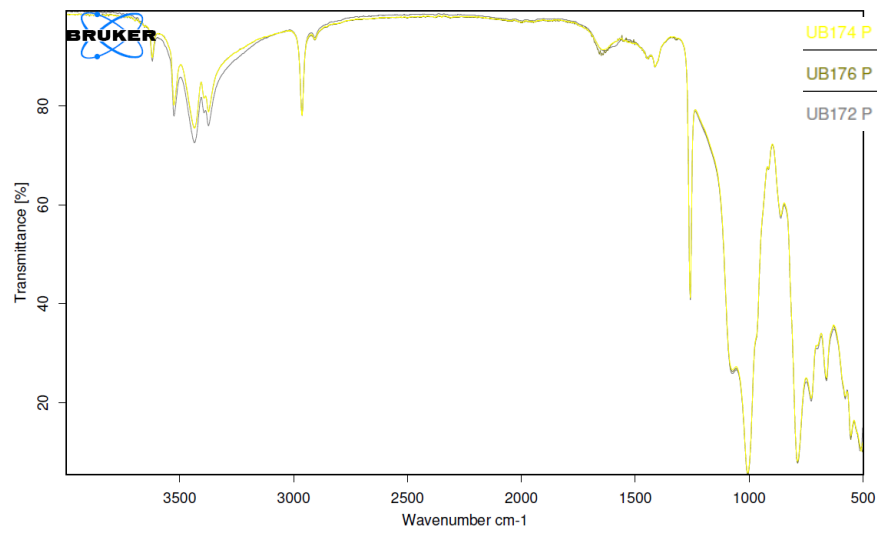
Σχήμα Α - 21. Φάσμα FTIR για μονωτήρα UB14 (δοκίμια «P»).



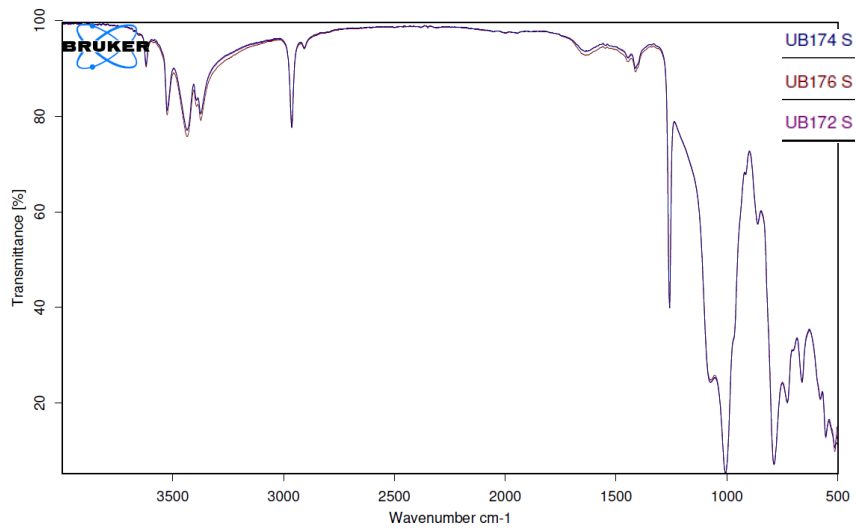
Σχήμα Α - 22. Φάσμα FTIR για το μονωτήρα UB14 (δοκίμια «S»).



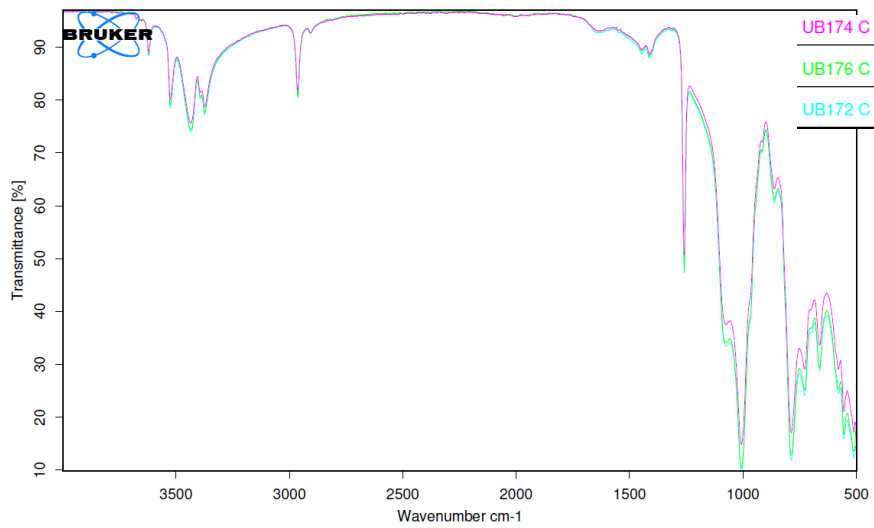
Σχήμα Α - 23. Φάσμα FTIR για το μονωτήρα UB14 (δοκίμια «C»).



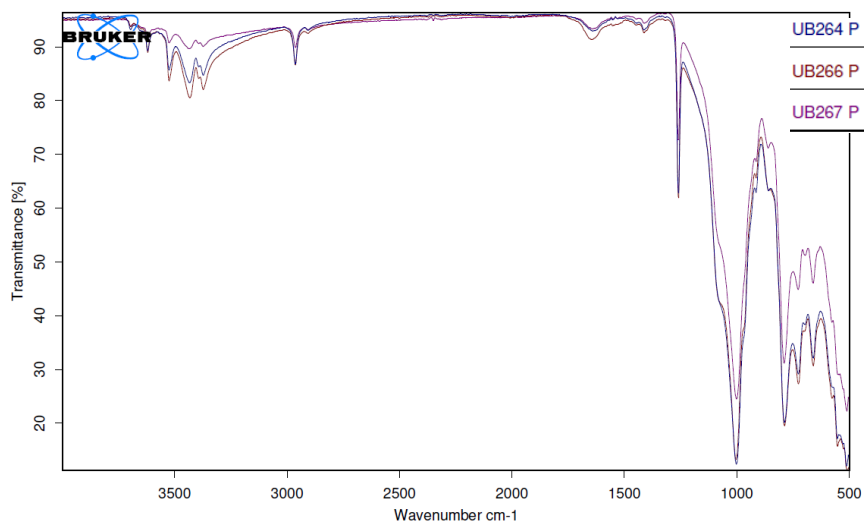
Σχήμα Α - 24. Φάσμα FTIR για μονωτήρα UB17 (δοκίμια «P»).



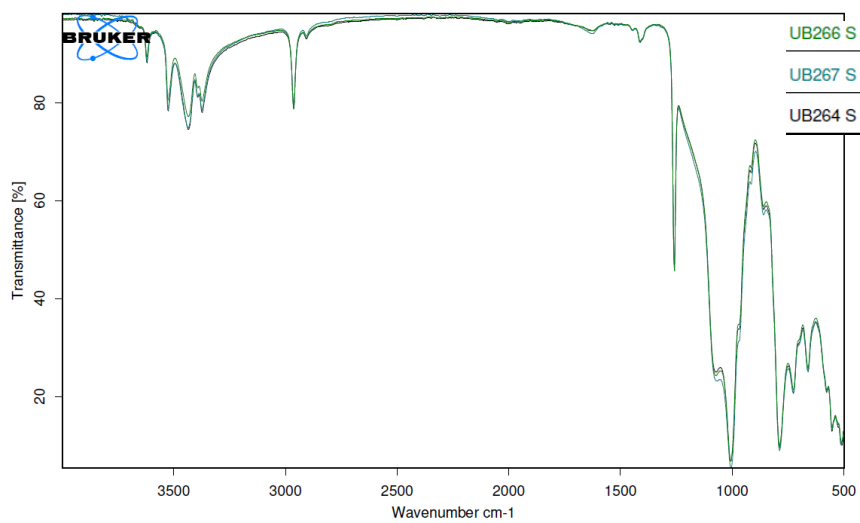
Σχήμα Α - 25. Φάσμα FTIR για το μονωτήρα UB17 (δοκίμια «S»).



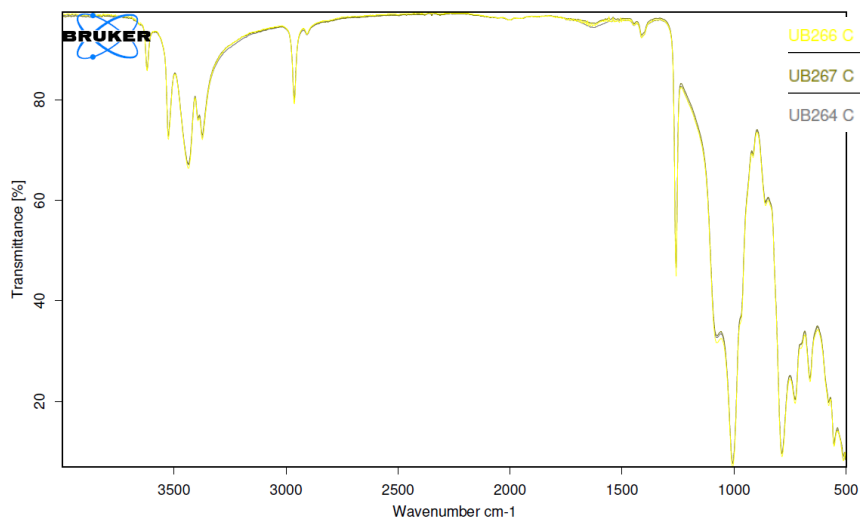
Σχήμα Α - 26. Φάσμα FTIR για το μονωτήρα UB17 (δοκίμια «C»).



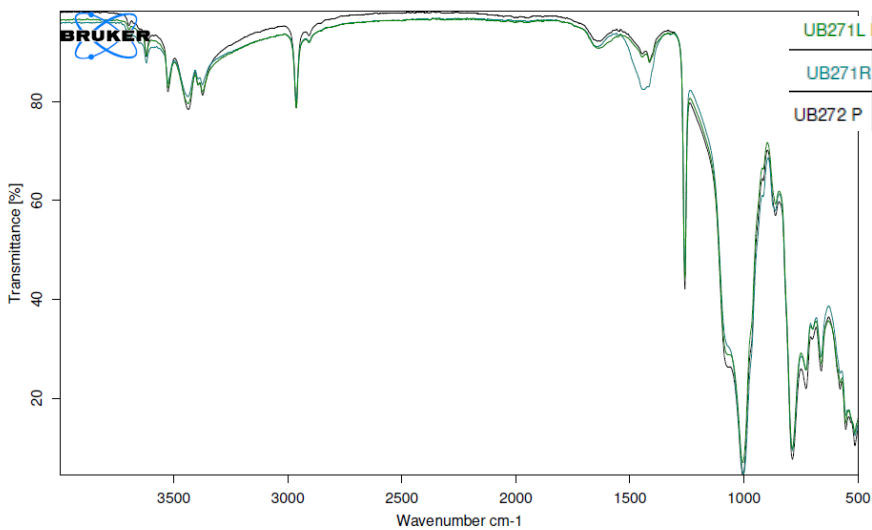
Σχήμα Α - 27. Φάσμα FTIR για μονωτήρα UB26 (δοκίμια «P»).



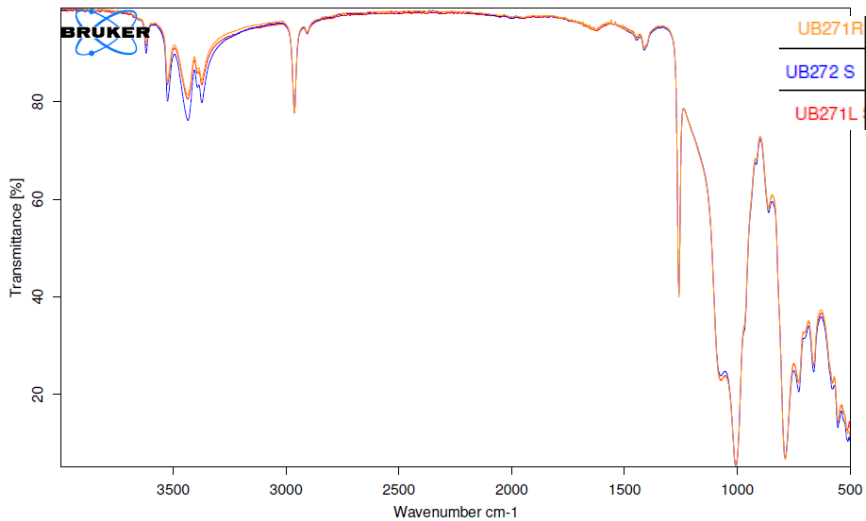
Σχήμα Α - 28. Φάσμα FTIR για το μονωτήρα UB26 (δοκίμια «S»).



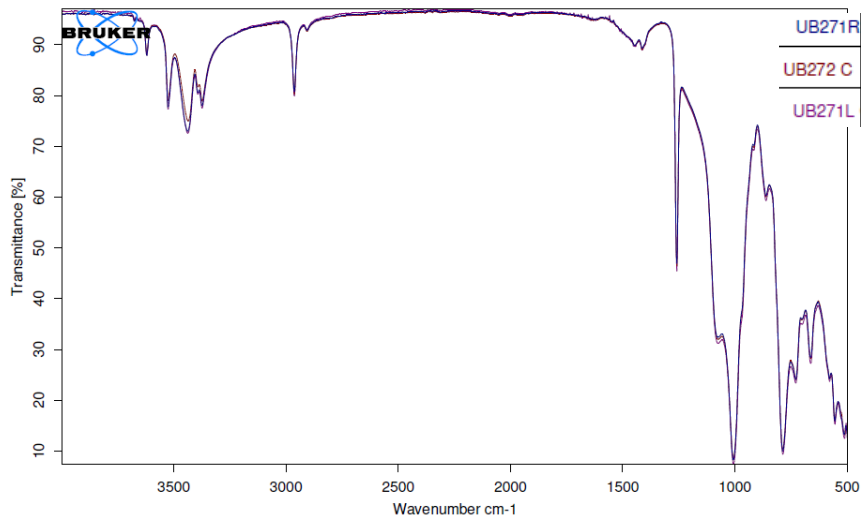
Σχήμα Α - 29. Φάσμα FTIR για το μονωτήρα UB26 (δοκίμια «C»).



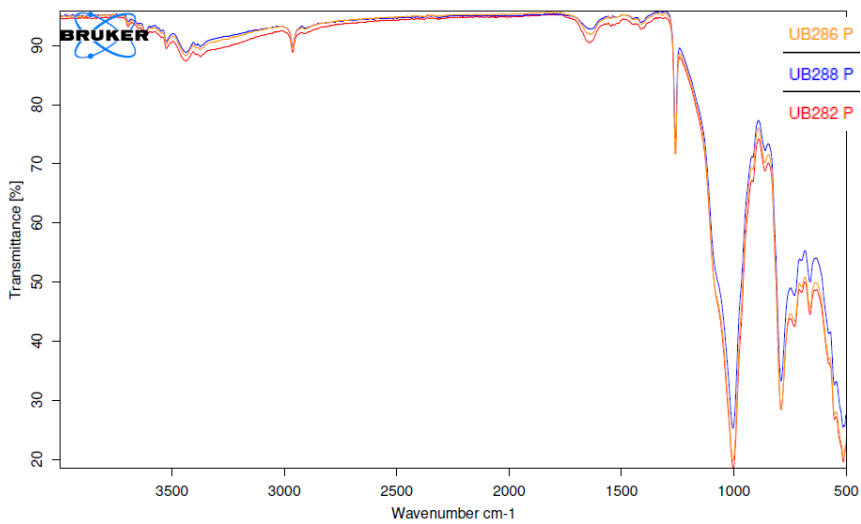
Σχήμα Α - 30. Φάσμα FTIR για μονωτήρα UB27 (δοκίμια «P»).



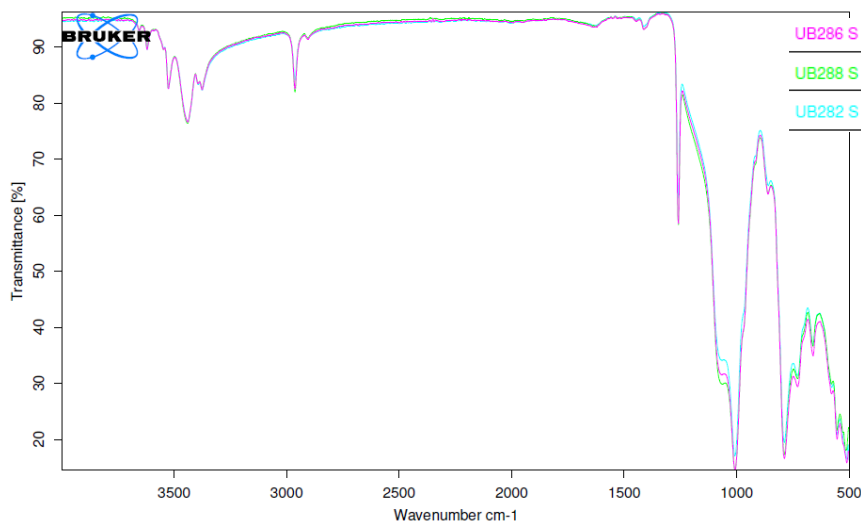
Σχήμα Α - 31. Φάσμα FTIR για το μονωτήρα UB27 (δοκίμια «S»).



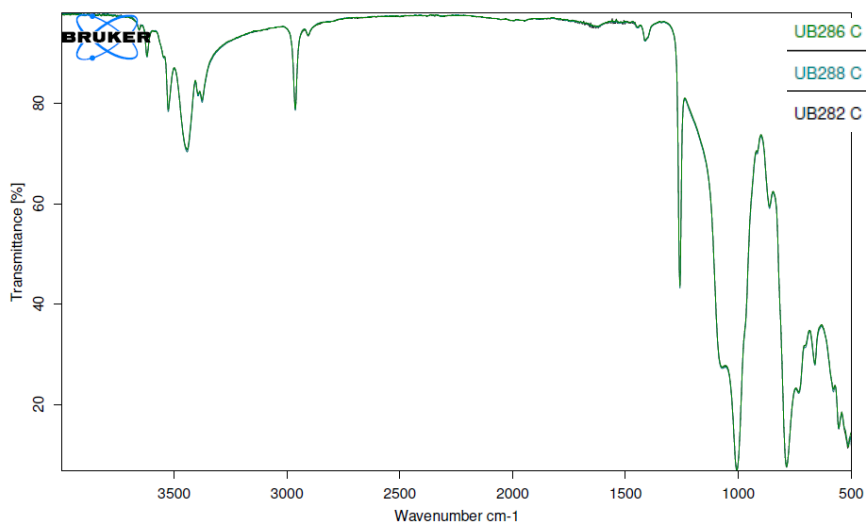
Σχήμα Α - 32. Φάσμα FTIR για το μονωτήρα UB27 (δοκίμια «C»).



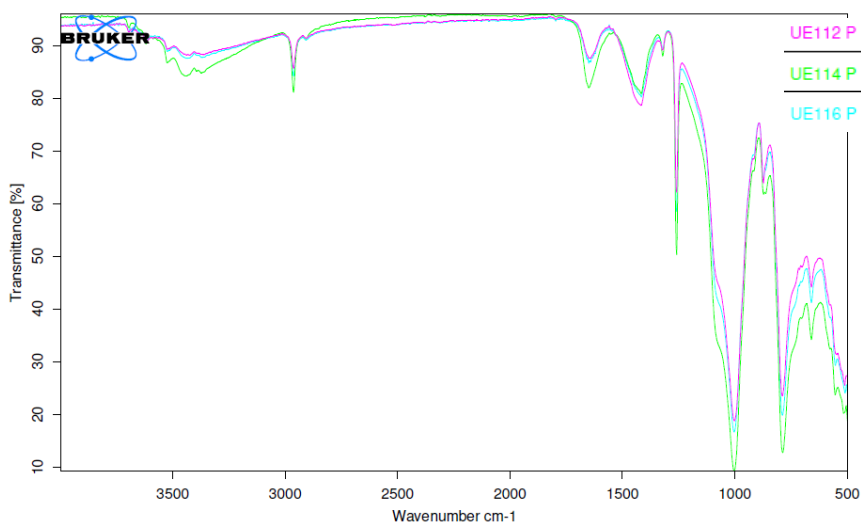
Σχήμα Α - 33. Φάσμα FTIR για μονωτήρα UB28 (δοκίμια «P»).



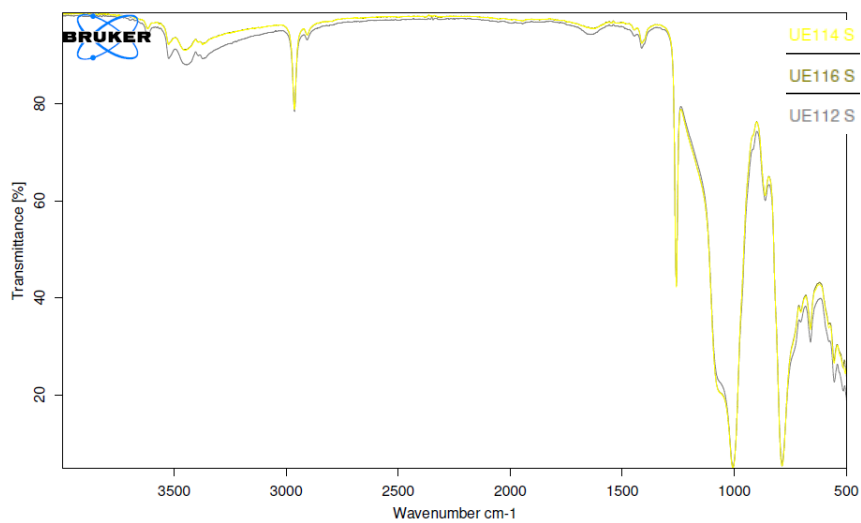
Σχήμα Α - 34. Φάσμα FTIR για το μονωτήρα UB28 (δοκίμια «S»).



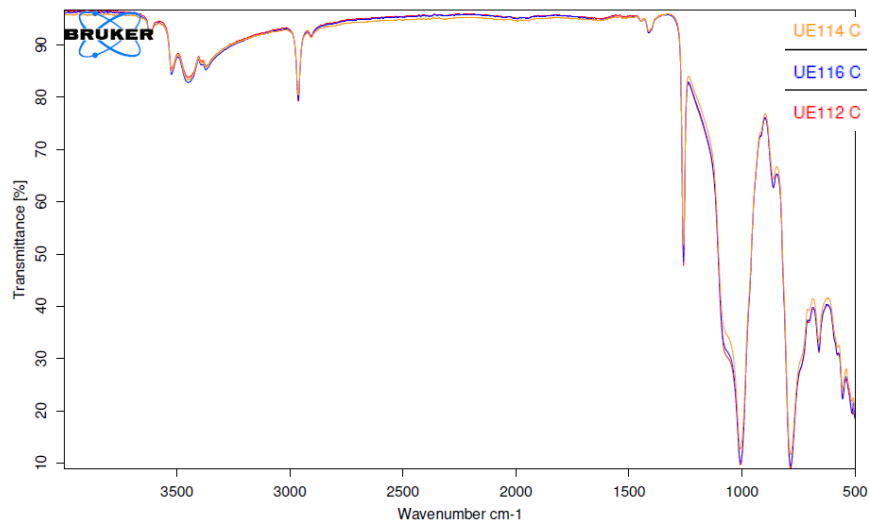
Σχήμα Α - 35. Φάσμα FTIR για το μονωτήρα UB28 (δοκίμια «C»).



Σχήμα Α - 36. Φάσμα FTIR για μονωτήρα UE11 (δοκίμια «P»).



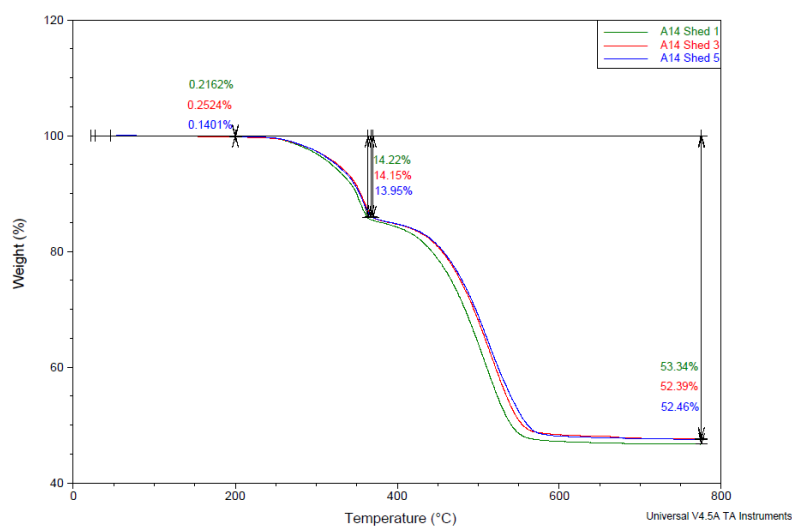
Σχήμα Α - 37. Φάσμα FTIR για το μονωτήρα UE11 (δοκίμια «S»).



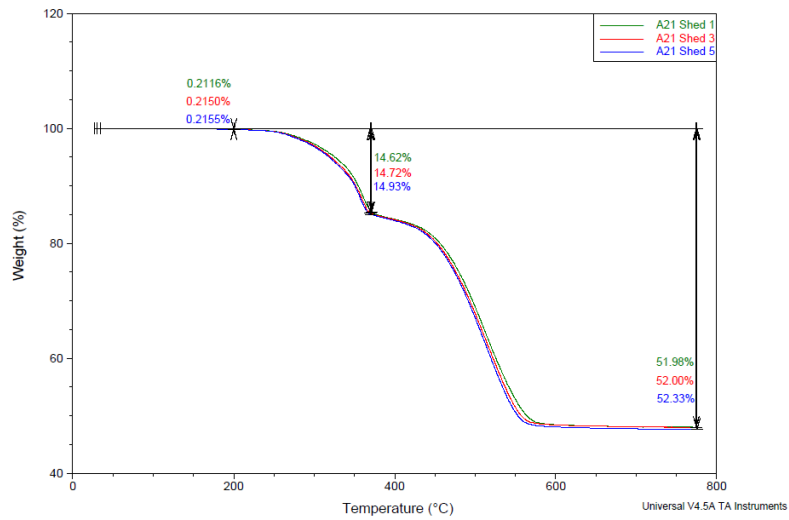
Σχήμα Α - 38. Φάσμα FTIR για το μονωτήρα UE11 (δοκίμια «C»).

Παράρτημα Β

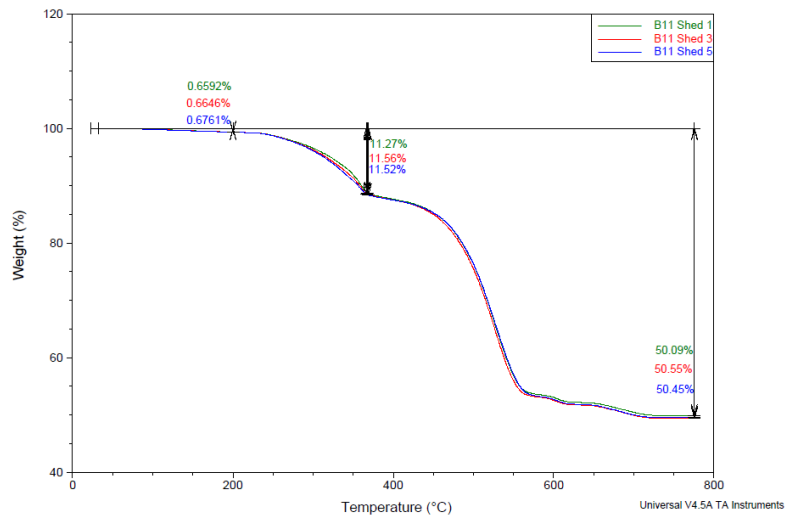
Σε αυτό το παράρτημα παρατίθενται τα διαγράμματα (Βάρους (%) – Θερμοκρασίας (°C)) που λήφθηκαν κατά τη δοκιμή της θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης (TGA). Πιο συγκεκριμένα, παρατίθενται τα διαγράμματα από τις δοκιμές που έγιναν σε δοκίμια από το εσωτερικό του υλικού για τους καινούριους και για τους μεταχειρισμένους μονωτήρες, στα οποία φαίνονται οι ποσοστιαίες απώλειες βάρους των δοκιμίων κατά την 1^η (αποσύνθεση του ATH) και 2^η φάση (αποσύνθεση του PDMS) όπως αυτές περιγράφονται στο υποκεφάλαιο 2.2.1.8. Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων αυτών ελήφθησαν 3 δοκίμια (για λόγους επαναληψιμότητας) από έναν καινούριο μονωτήρα από κάθε κατασκευαστή και από κάθε τύπο και 3 δοκίμια από έναν μεταχειρισμένο μονωτήρα από κάθε χρωματική ομάδα των πινάκων 3-5 και 3-6. Τα διαγράμματα (Βάρους (%) – Θερμοκρασίας (°C)) που προέκυψαν από αυτές τις δοκιμές φαίνονται στα σχήματα Β-1 έως και Β-19.



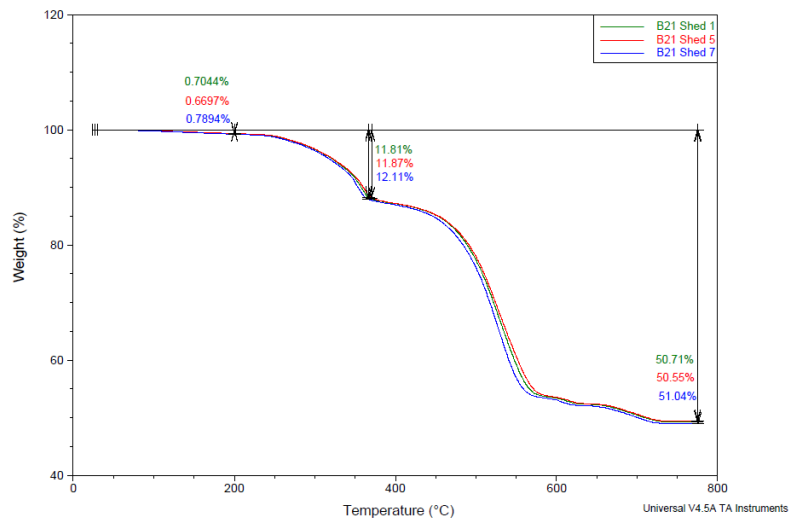
Σχήμα Β - 39. Διάγραμμα TGA για μονωτήρα Α1.



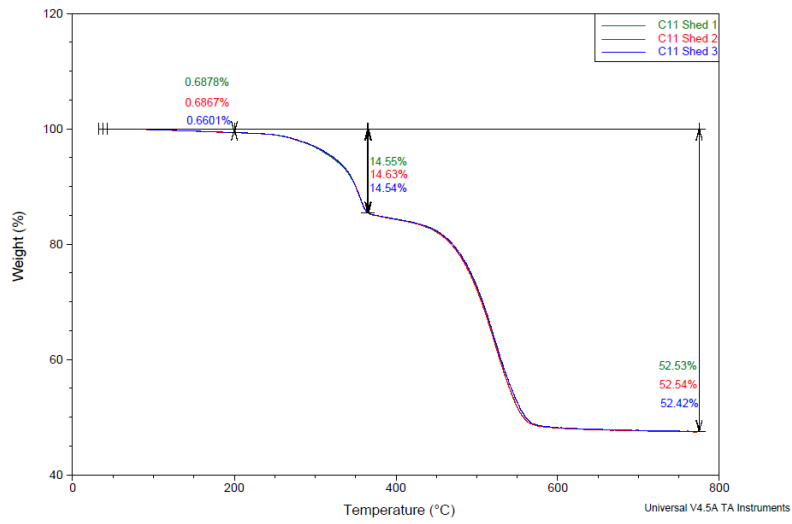
Σχήμα Β - 40. Διάγραμμα TGA για μονωτήρα Α2.



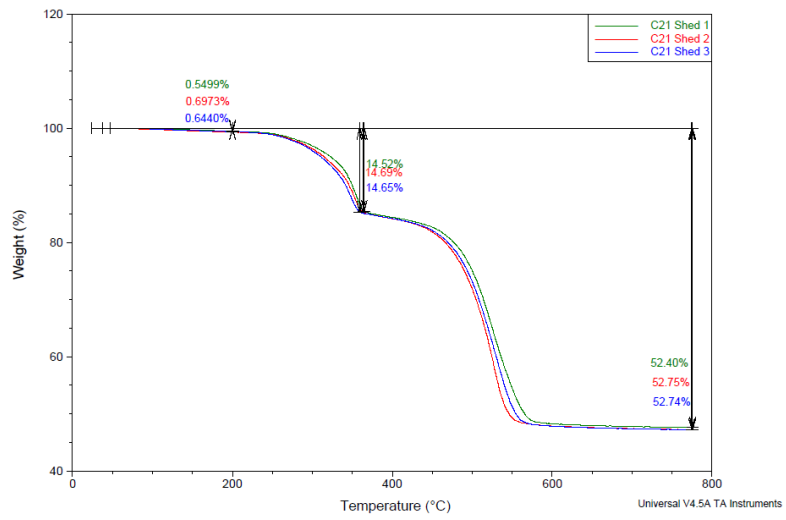
Σχήμα Β - 41. Διάγραμμα TGA για μονωτήρα Β1.



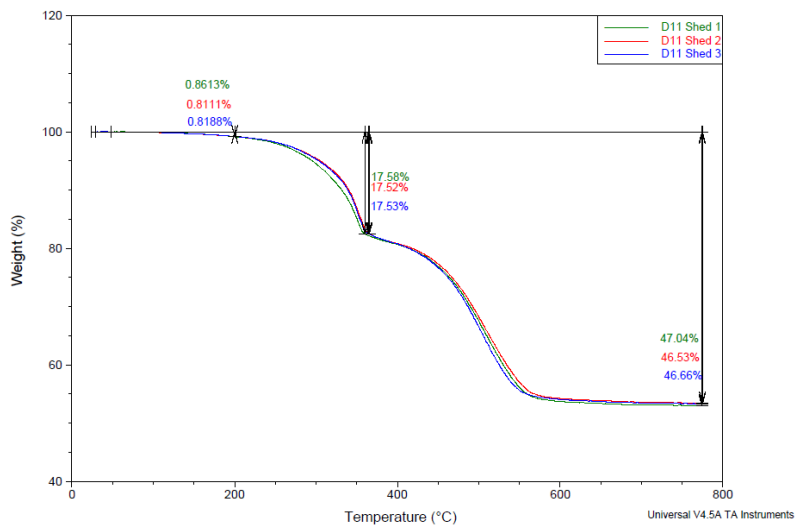
Σχήμα Β - 42. Διάγραμμα TGA για μονωτήρα Β2.



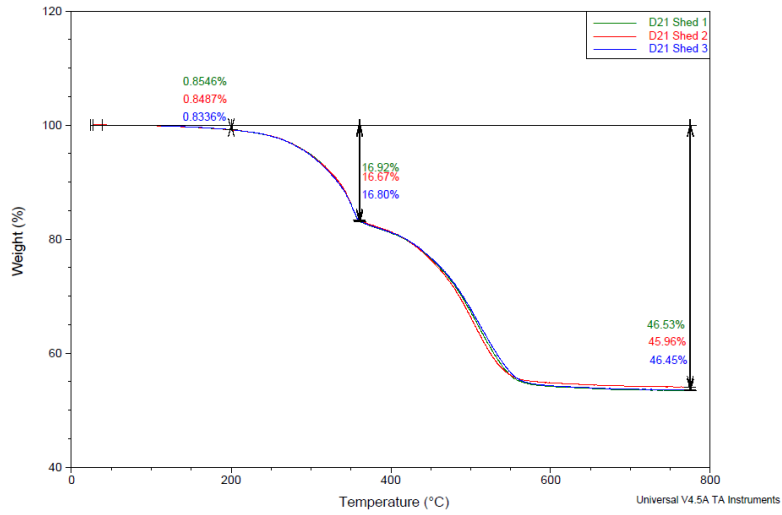
Σχήμα Β - 43. Διάγραμμα TGA για μονωτήρα C1.



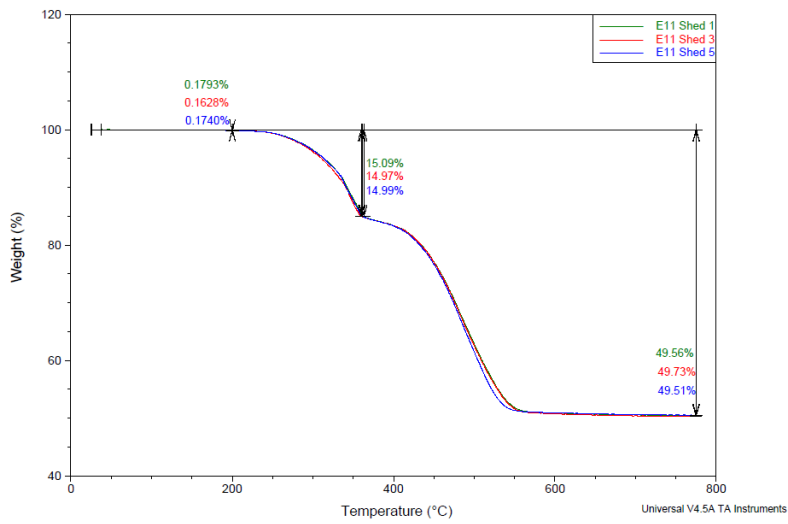
Σχήμα Β - 44. Διάγραμμα TGA για μονωτήρα C2.



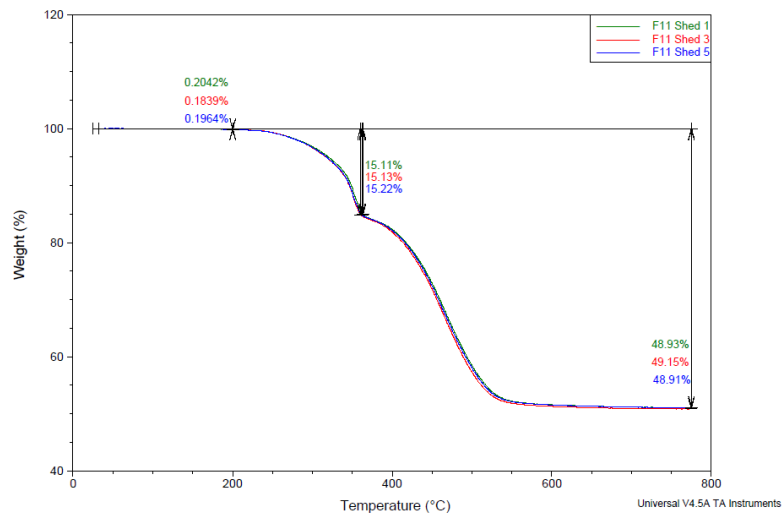
Σχήμα Β - 45. Διάγραμμα TGA για μονωτήρα D1.



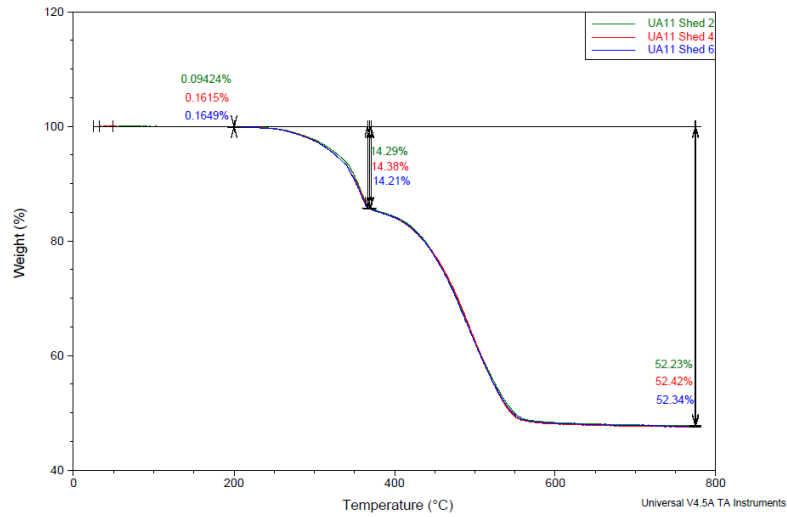
Σχήμα Β - 46. Διάγραμμα TGA για μονωτήρα D2.



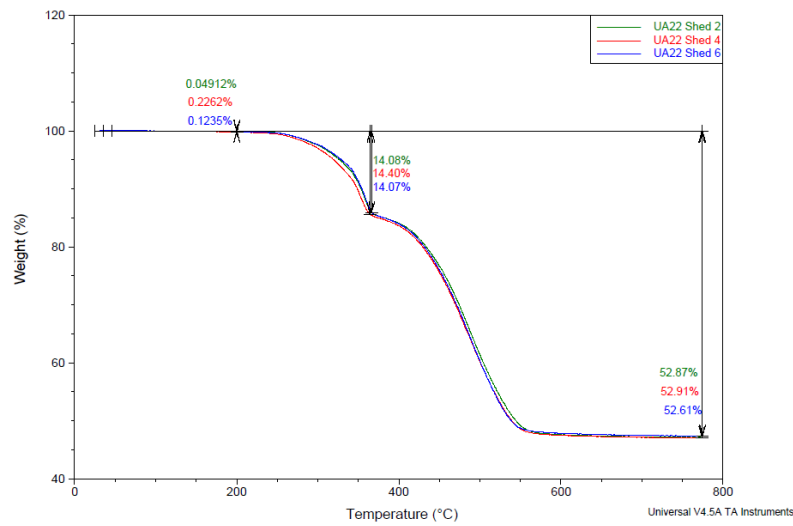
Σχήμα Β - 47. Διάγραμμα TGA για μονωτήρα E1.



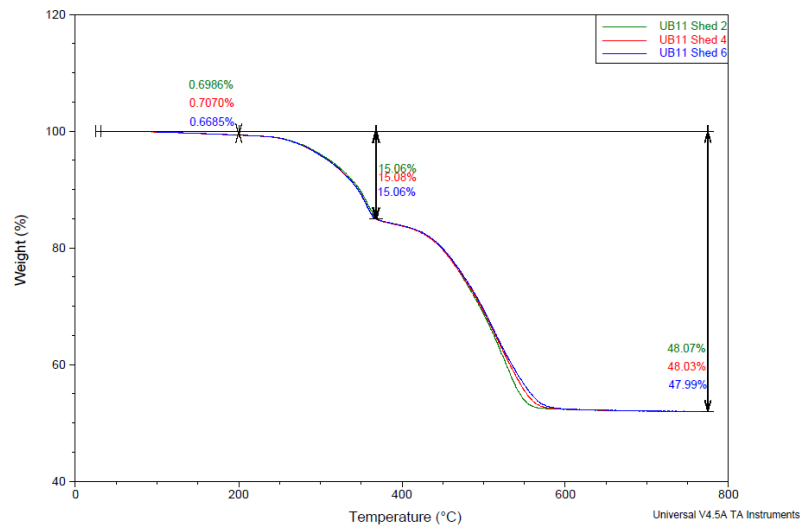
Σχήμα Β - 48. Διάγραμμα TGA για μονωτήρα F1.



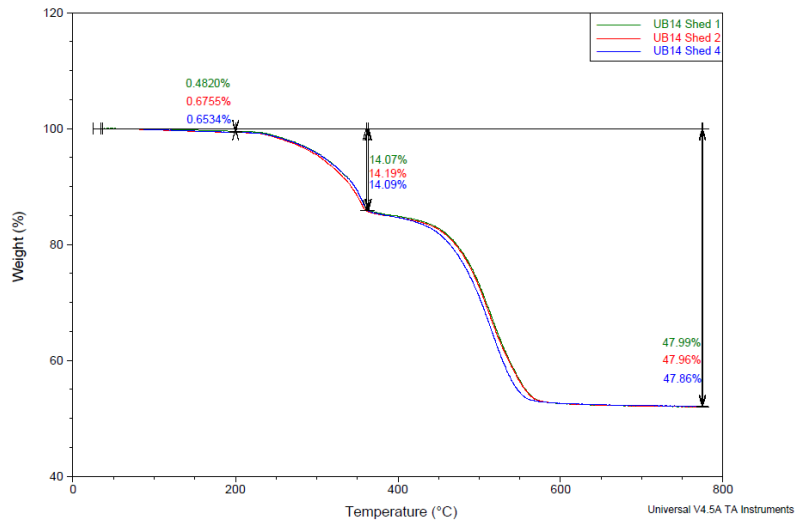
Σχήμα Β - 49. Διάγραμμα TGA για το μονωτήρα UA11.



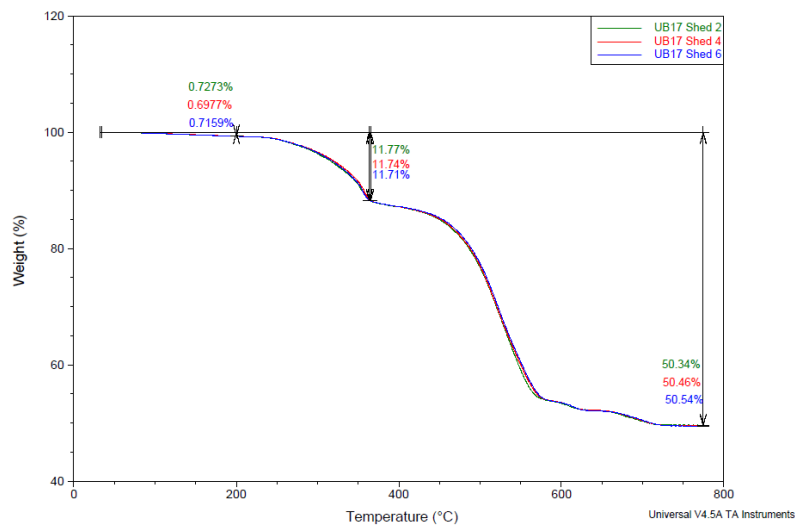
Σχήμα Β - 50. Διάγραμμα TGA για μονωτήρα UA22.



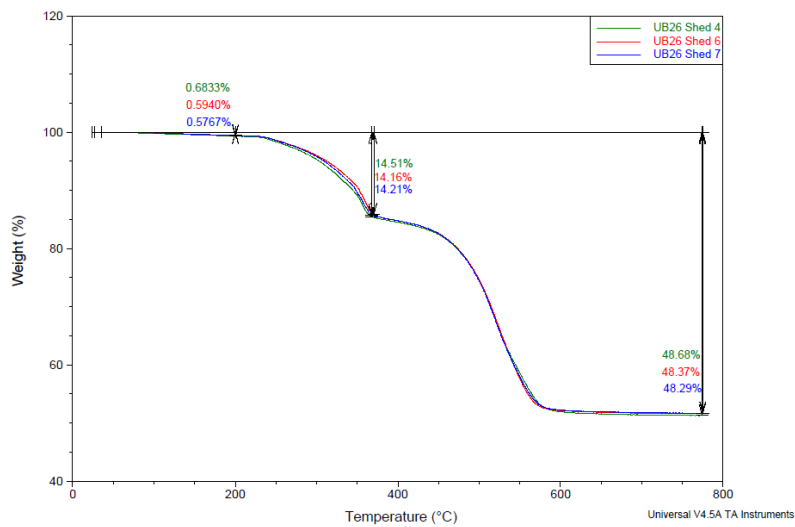
Σχήμα Β - 51. Διάγραμμα TGA για μονωτήρα UB11.



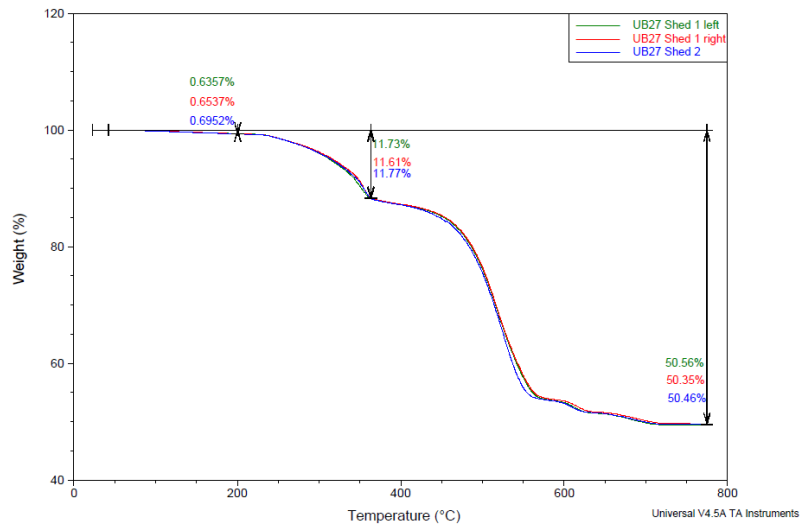
Σχήμα Β - 52. Διάγραμμα TGA για μονωτήρα UB14.



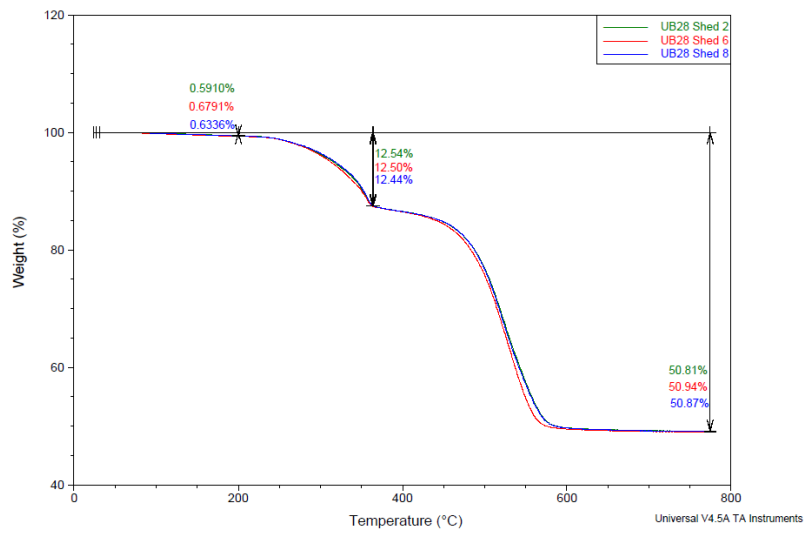
Σχήμα Β - 53. Διάγραμμα TGA για μονωτήρα UB17.



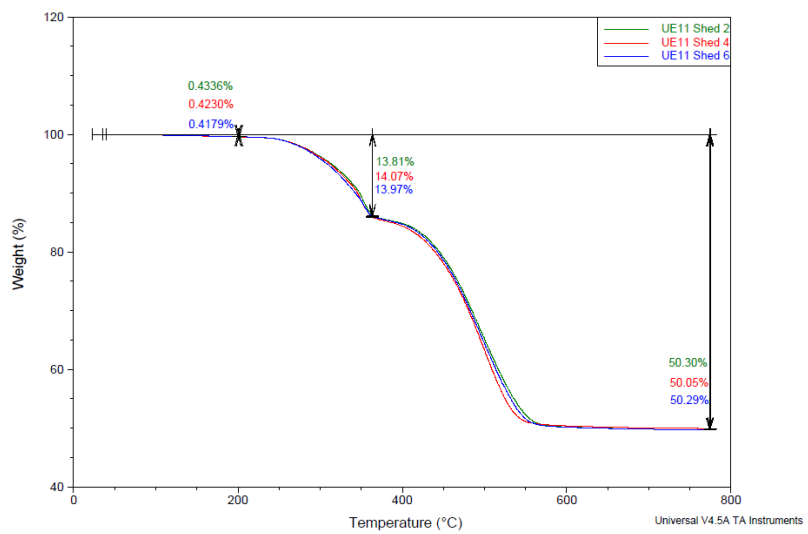
Σχήμα Β - 54. Διάγραμμα TGA για μονωτήρα UB26.



Σχήμα Β - 55. Διάγραμμα TGA για μονωτήρα UB27.



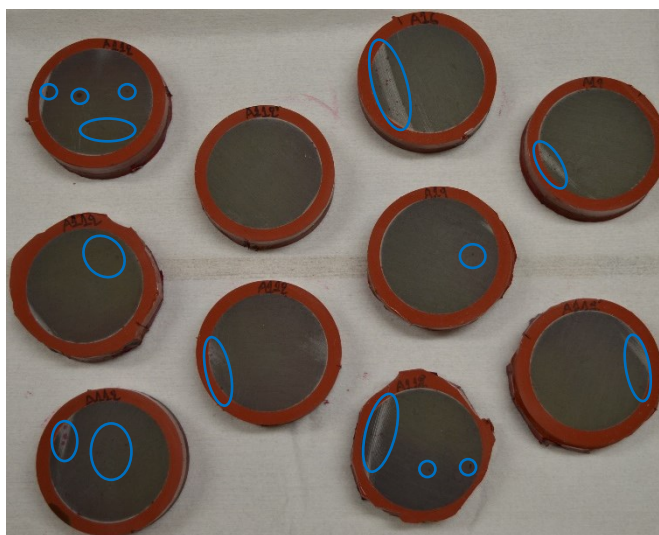
Σχήμα Β - 56. Διάγραμμα TGA για μονωτήρα UB28.



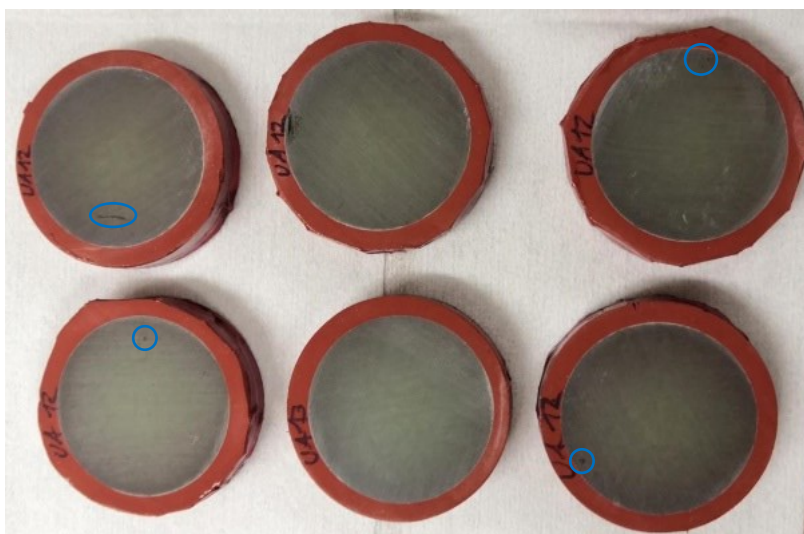
Σχήμα Β - 57. Διάγραμμα TGA για μονωτήρα UE11.

Παράρτημα Γ

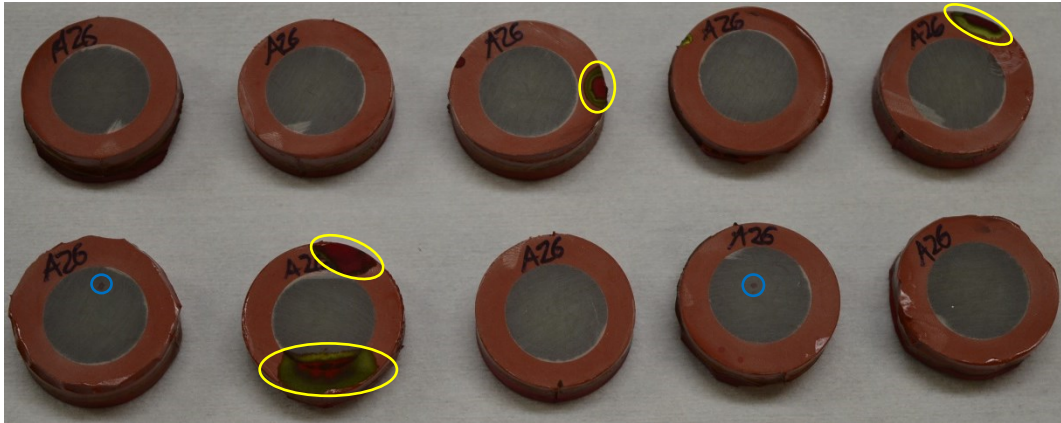
Σε αυτό το παράρτημα παρατίθενται τα αποτελέσματα της δοκιμής διείσδυσης βαφής (Dye Penetration test) στους καινούριους και στους μεταχειρισμένους συνθετικούς μονωτήρες που εξετάστηκαν στη συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με φωτογραφίες των δοκιμών μετά την εκτέλεση της δοκιμής και συγκεκριμένα στα σχήματα Γ-1 έως Γ-19. Με κύκλους μπλε χρώματος έχουν επισημανθεί τα σημάδια από τη διείσδυση της βαφής στις ράβδους (ανεπιτυχές αποτέλεσμα), ενώ με κίτρινους κύκλους σημάνθηκαν τα σημεία όπου η βαφή ανέβηκε από τα τοιχώματα του μονωτικού περιβλήματος στο πάνω μέρος των δοκιμών (φαινόμενο capillary – επεξήγηση / τεχνική αποφυγής του στο υποκεφάλαιο 3.4.2.2) (δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα).



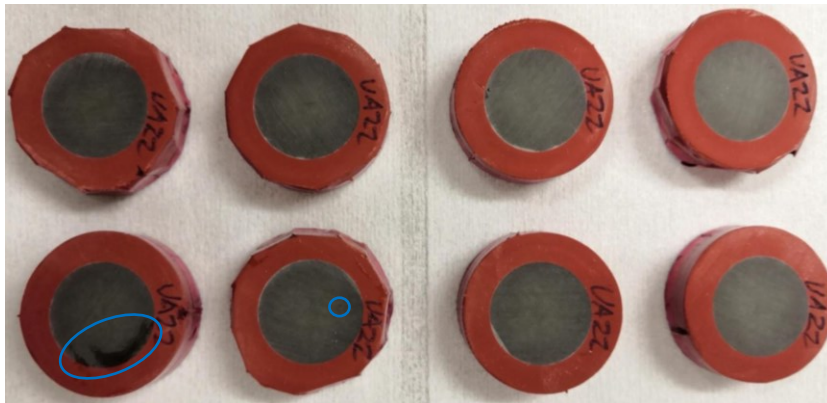
Σχήμα Γ - 1. Δοκίμια μονωτήρων A1 μετά τη δοκιμή διείσδυσης βαφής.



Σχήμα Γ - 2. Δοκίμια μονωτήρων UA1 (2 χρόνια στο δίκτυο) μετά τη δοκιμή διείσδυσης βαφής.



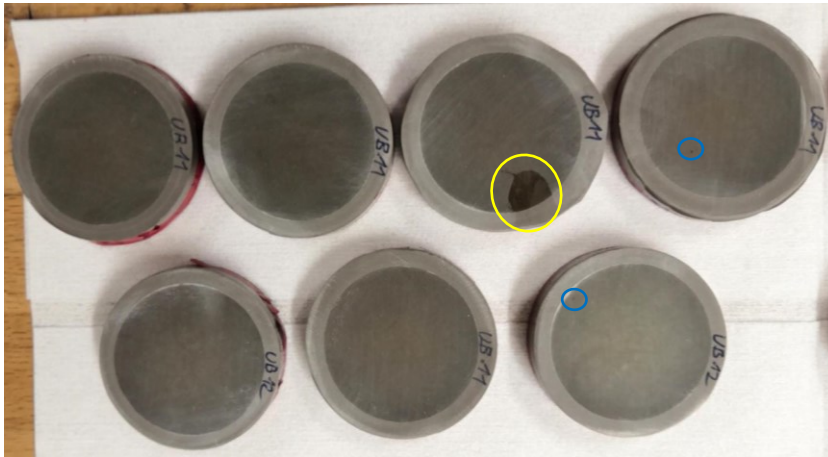
Σχήμα Γ - 3. Δοκίμια μονωτήρων A2 μετά τη δοκιμή διείσδυσης βαφής.



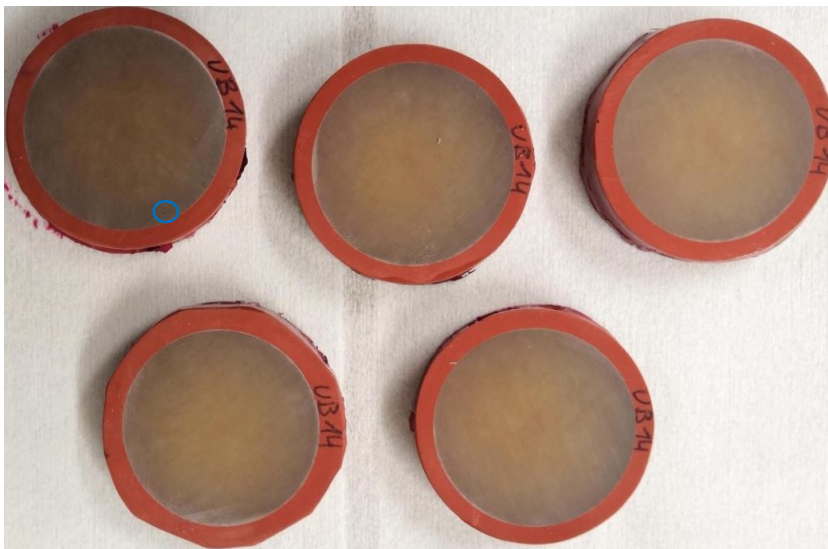
Σχήμα Γ - 4. Δοκίμια μονωτήρων UA2 (2 χρόνια στο δίκτυο) μετά τη δοκιμή διείσδυσης βαφής.



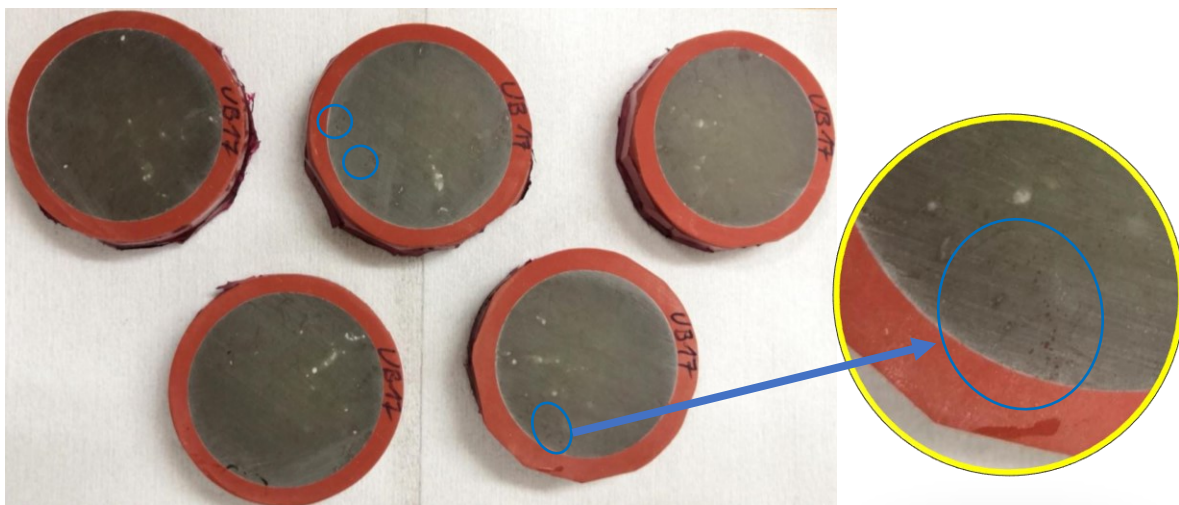
Σχήμα Γ - 5. Δοκίμια μονωτήρων B1 μετά τη δοκιμή διείσδυσης βαφής.



Σχήμα Γ - 6. Δοκίμια μονωτήρων UB1 (1^η ομάδα με 10 χρόνια στο δίκτυο) μετά τη δοκιμή διείσδυσης βαφής.



Σχήμα Γ - 7. Δοκίμια μονωτήρων UB1 (2^η ομάδα με 10 χρόνια στο δίκτυο) μετά τη δοκιμή διείσδυσης βαφής.



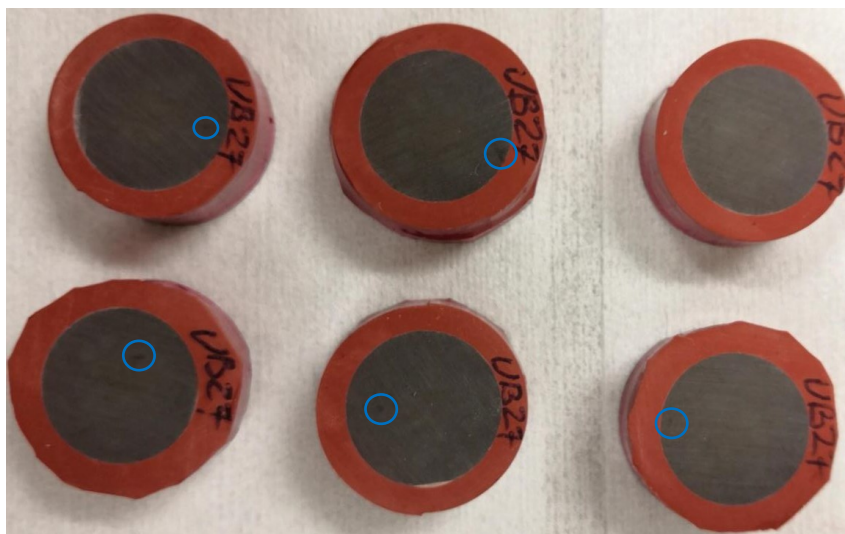
Σχήμα Γ - 8. Δοκίμια μονωτήρων UB1 (3^η ομάδα με 4 χρόνια στο δίκτυο) μετά τη δοκιμή διείσδυσης βαφής.



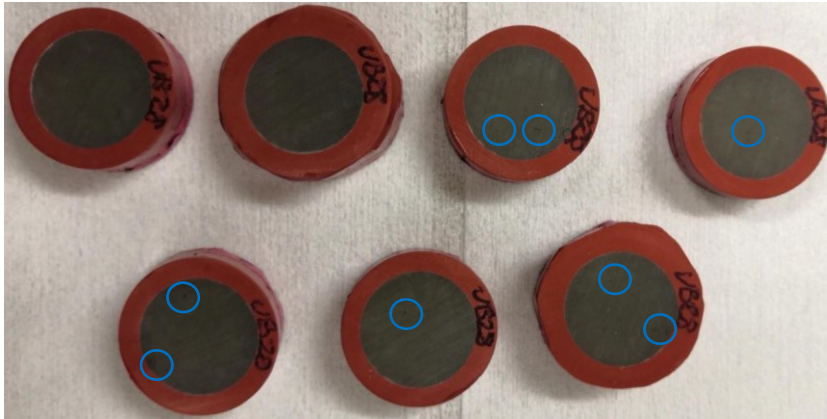
Σχήμα Γ - 9. Δοκίμια μονωτήρων B2 μετά τη δοκιμή διείσδυσης βαφής.



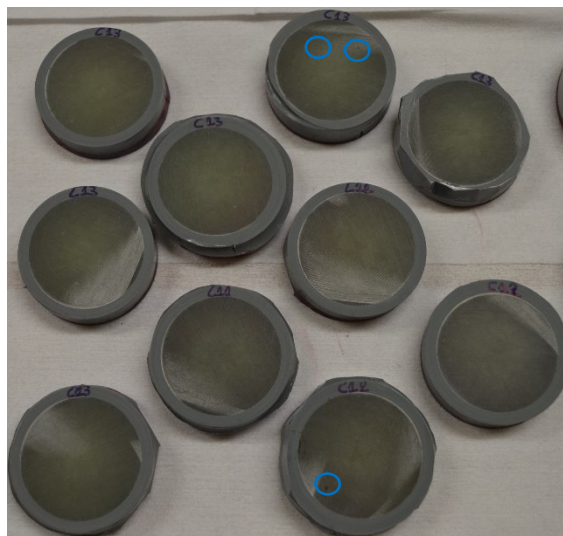
Σχήμα Γ - 10. Δοκίμια μονωτήρων UB2 (1^η ομάδα με 10 χρόνια στο δίκτυο) μετά τη δοκιμή διείσδυσης βαφής.



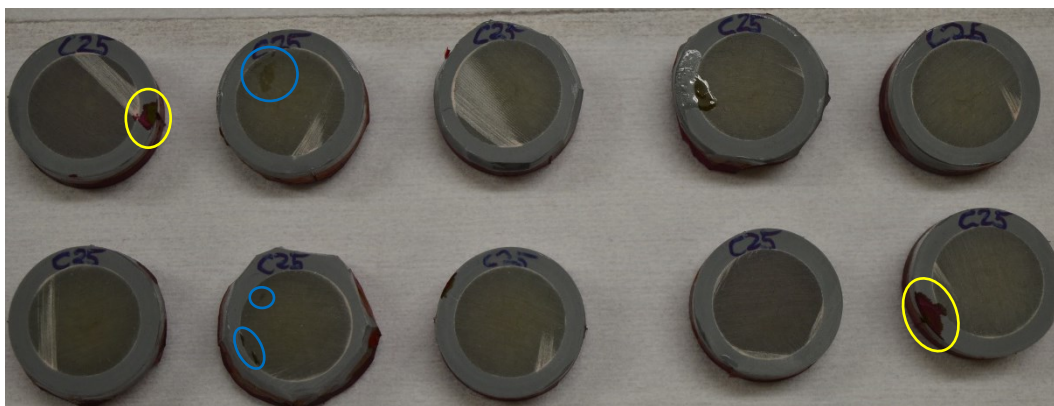
Σχήμα Γ - 11. Δοκίμια μονωτήρων UB2 (2^η ομάδα με 5 χρόνια στο δίκτυο) μετά τη δοκιμή διείσδυσης βαφής.



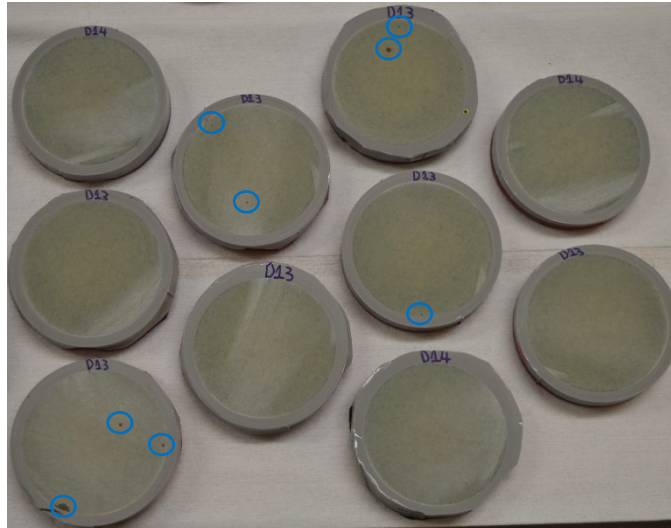
Σχήμα Γ - 12. Δοκίμια μονωτήρων UB2 (3^η ομάδα με 10 χρόνια στο δίκτυο) μετά τη δοκιμή διείσδυσης βαφής.



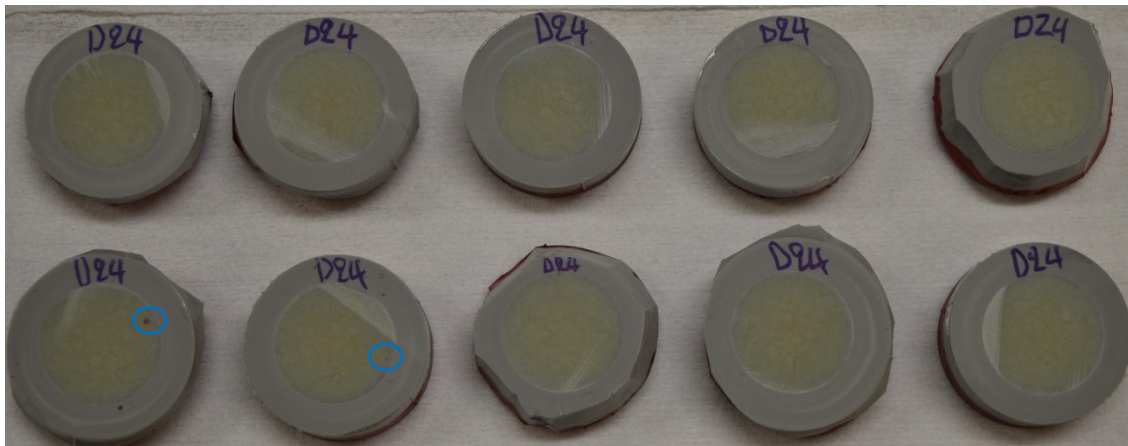
Σχήμα Γ - 13. Δοκίμια μονωτήρων C1 μετά τη δοκιμή διείσδυσης βαφής.



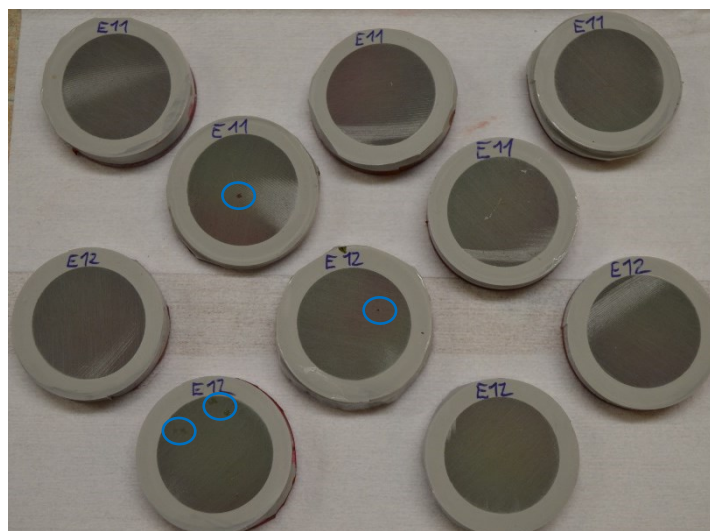
Σχήμα Γ - 14. Δοκίμια μονωτήρων C2 μετά τη δοκιμή διείσδυσης βαφής.



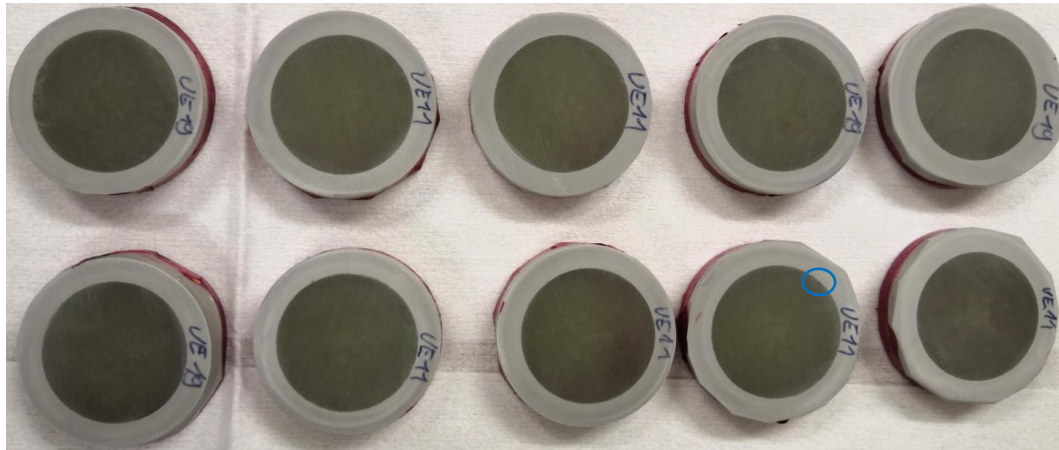
Σχήμα Γ - 15. Δοκίμια μονωτήρων D1 μετά τη δοκιμή διεύθυνσης βαφής.



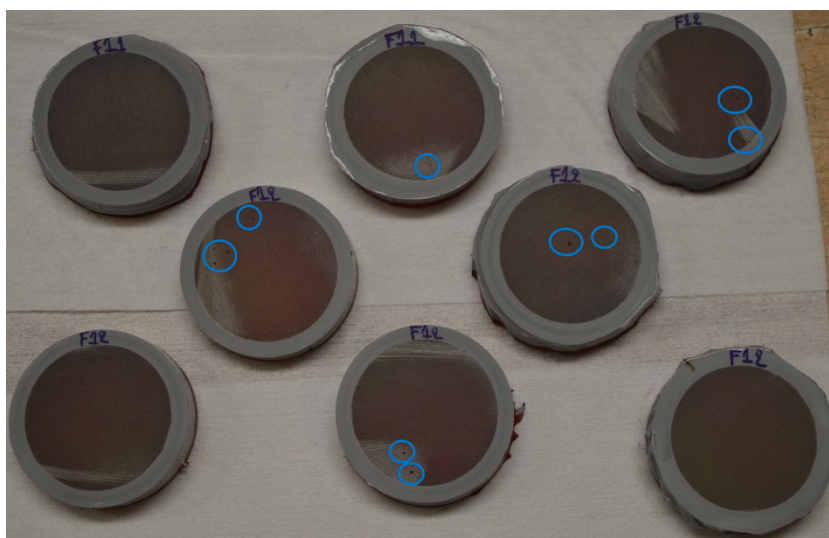
Σχήμα Γ - 16. Δοκίμια μονωτήρων D2 μετά τη δοκιμή διεύθυνσης βαφής.



Σχήμα Γ - 17. Δοκίμια μονωτήρων E1 μετά τη δοκιμή διεύθυνσης βαφής.



Σχήμα Γ - 18. Δοκίμια μονωτήρων UE1 (3 χρόνια σε εξωτερικό χώρο) μετά τη δοκιμή διείσδυσης βαφής.



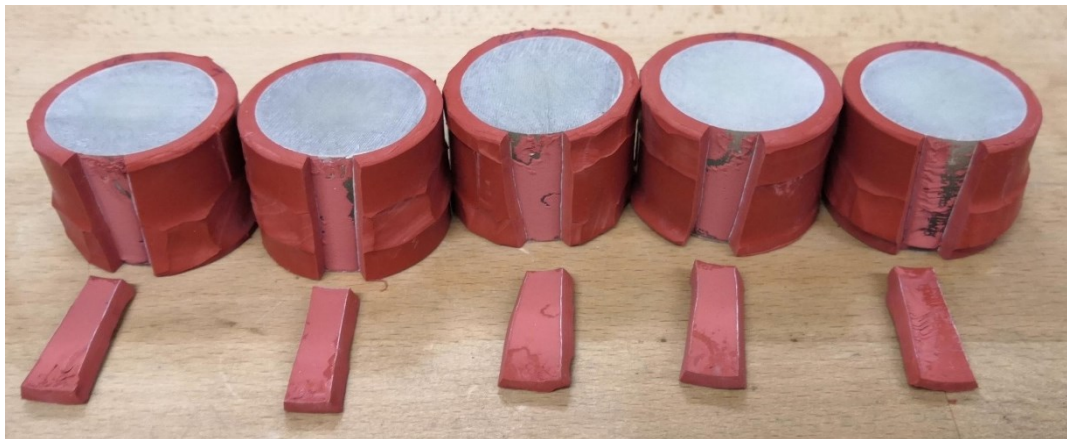
Σχήμα Γ - 19. Δοκίμια μονωτήρων C2 μετά τη δοκιμή διείσδυσης βαφής.

Παράρτημα Δ

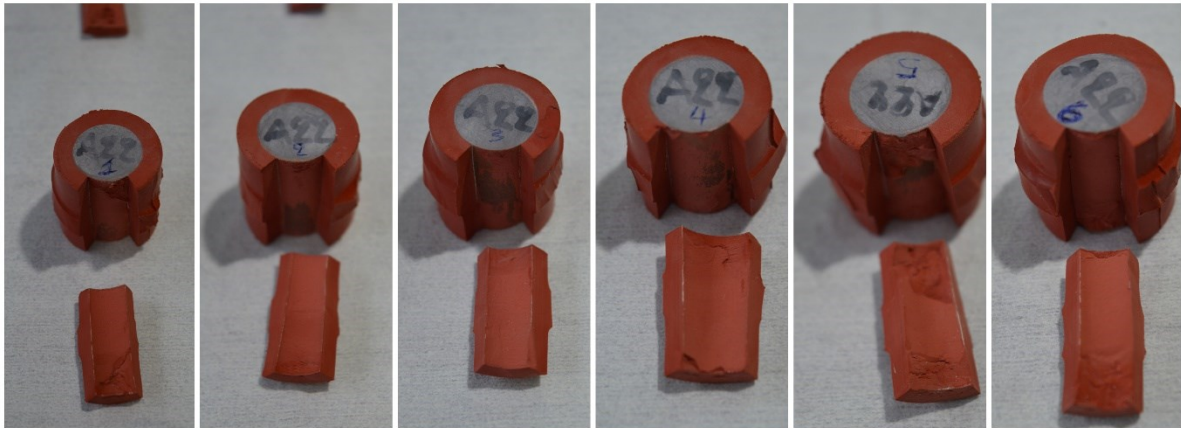
Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται τα δοκίμια της δοκιμής διάχυσης νερού (water diffusion test), αφού πραγματοποιήθηκε σε αυτά και η δοκιμή διερεύνησης της σύνδεσης της ράβδου με το μονωτικό περίβλημα (adhesion test), όπως αυτή περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 3.4.3 της παρούσης διδακτορικής διατριβής (σχήματα Δ-1 έως Δ-19).



Σχήμα Δ - 1. Δοκίμια των μονωτήρων Α1.



Σχήμα Δ - 2. Δοκίμια των μονωτήρων UA1.



Σχήμα Δ - 3. Δοκίμια των μονωτήρων Α2.



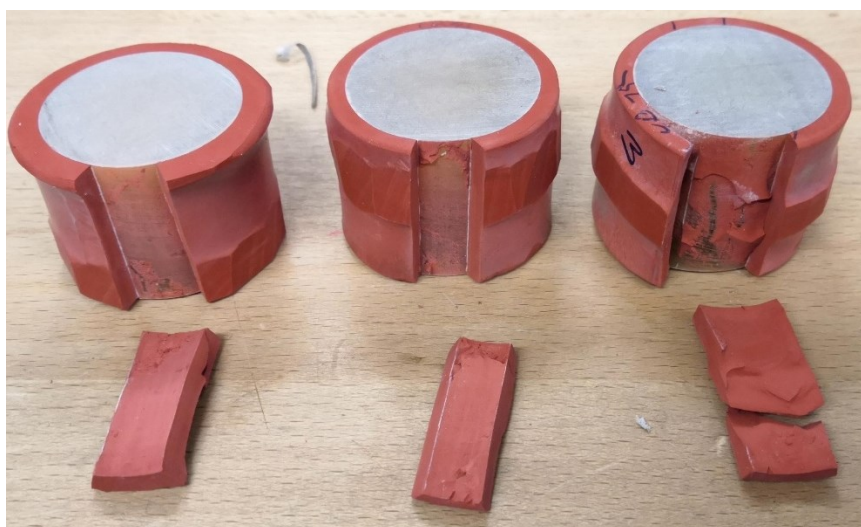
Σχήμα Δ - 4. Δοκίμια των μονωτήρων UA2.



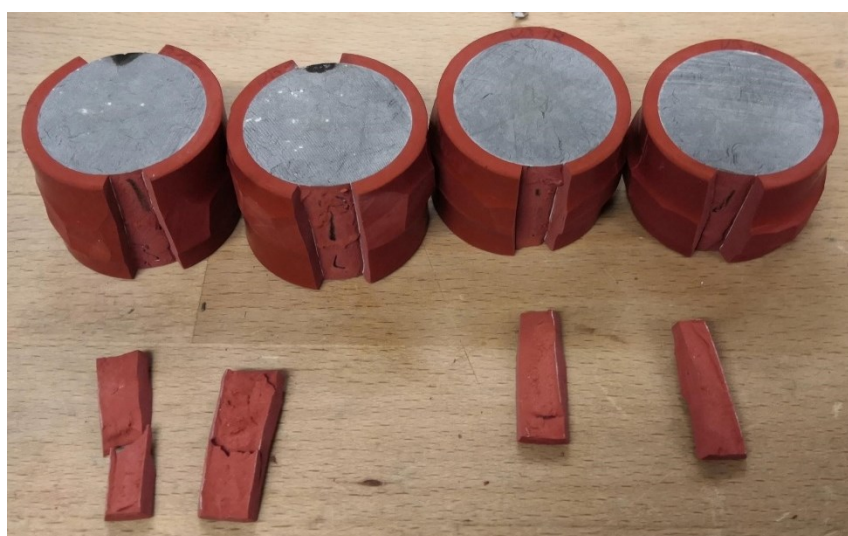
Σχήμα Δ - 5. Δοκίμια των μονωτήρων B1.



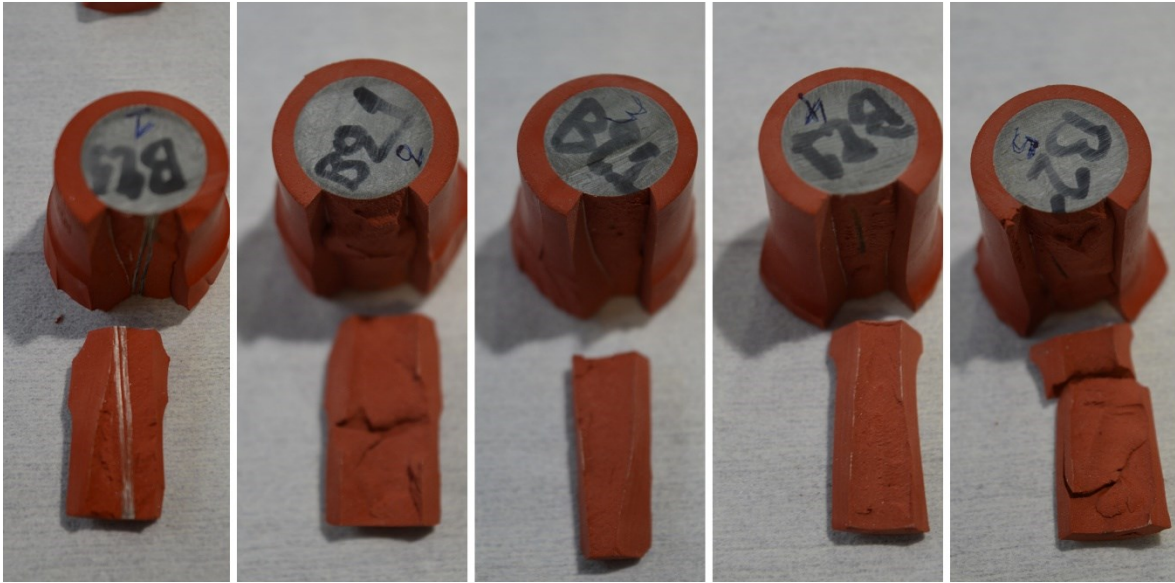
Σχήμα Δ - 6. Δοκίμια των μονωτήρων UB1 (1η Ομάδα).



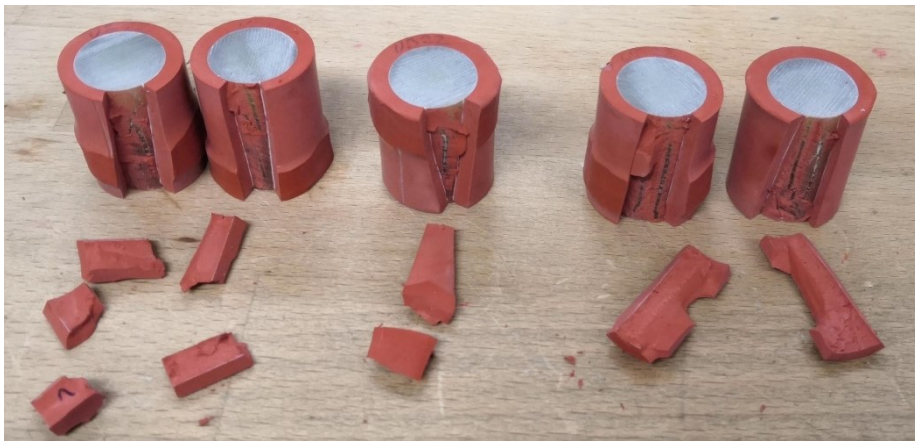
Σχήμα Δ - 7. Δοκίμια των μονωτήρων UB1 (2η Ομάδα).



Σχήμα Δ - 8. Δοκίμια των μονωτήρων UB1 (3η Ομάδα).



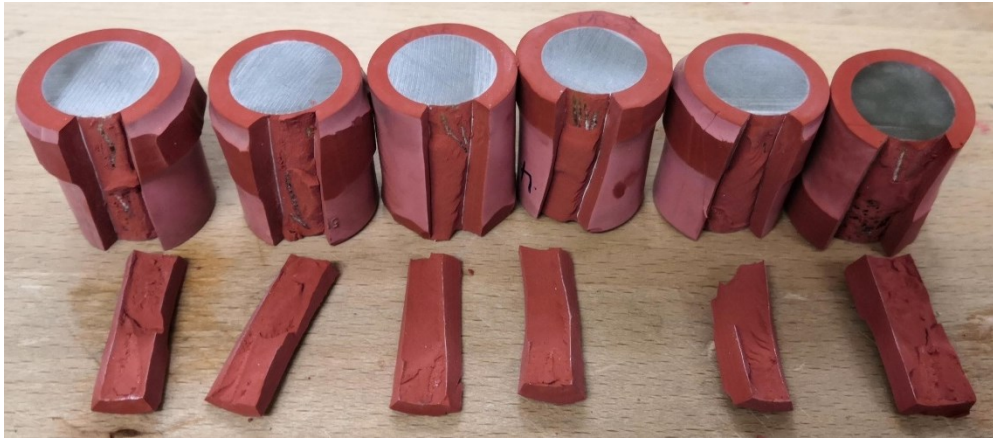
Σχήμα Δ - 9. Δοκίμια των μονωτήρων Β2.



Σχήμα Δ - 10. Δοκίμια των μονωτήρων UB2 (1η Ομάδα).



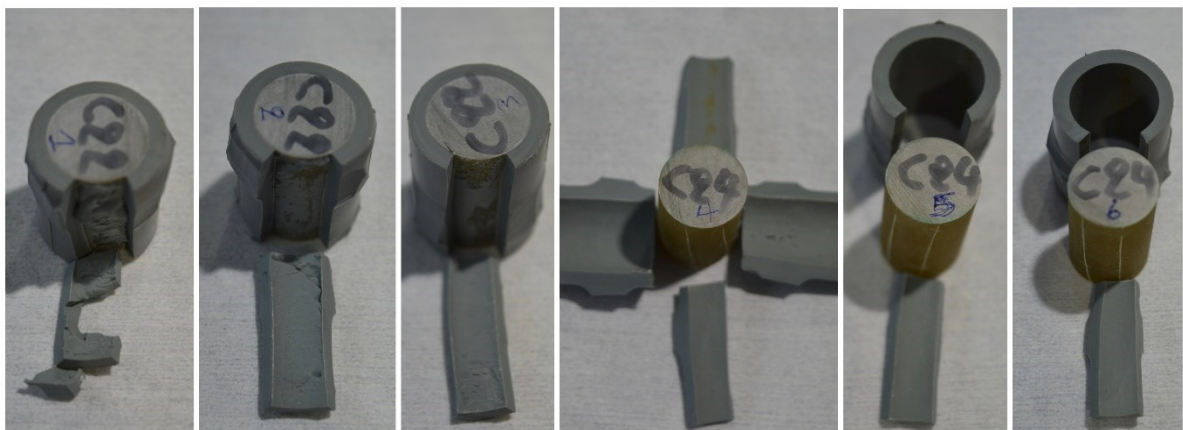
Σχήμα Δ - 11. Δοκίμια των μονωτήρων UB2 (2η Ομάδα).



Σχήμα Δ - 12. Δοκίμια των μονωτήρων UB2 (3η Ομάδα).



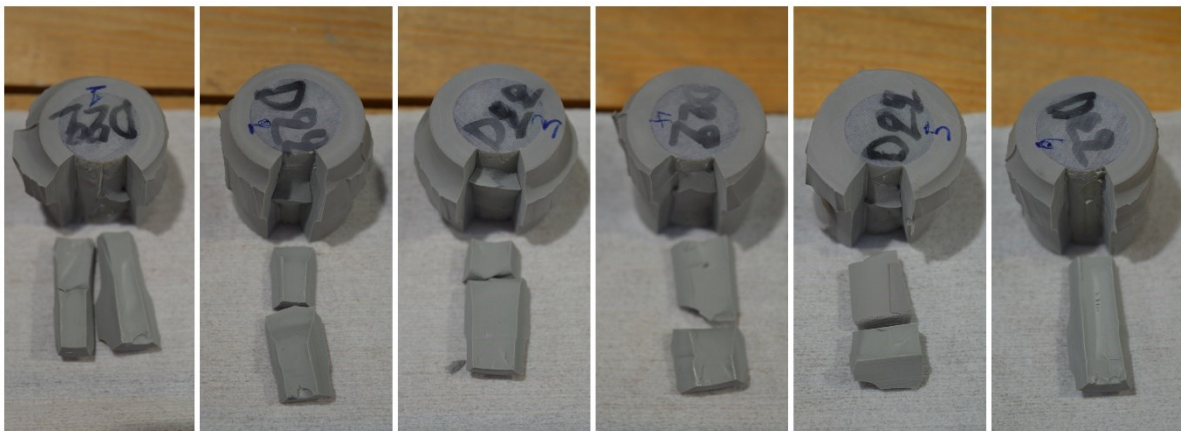
Σχήμα Δ - 13. Δοκίμια των μονωτήρων C1.



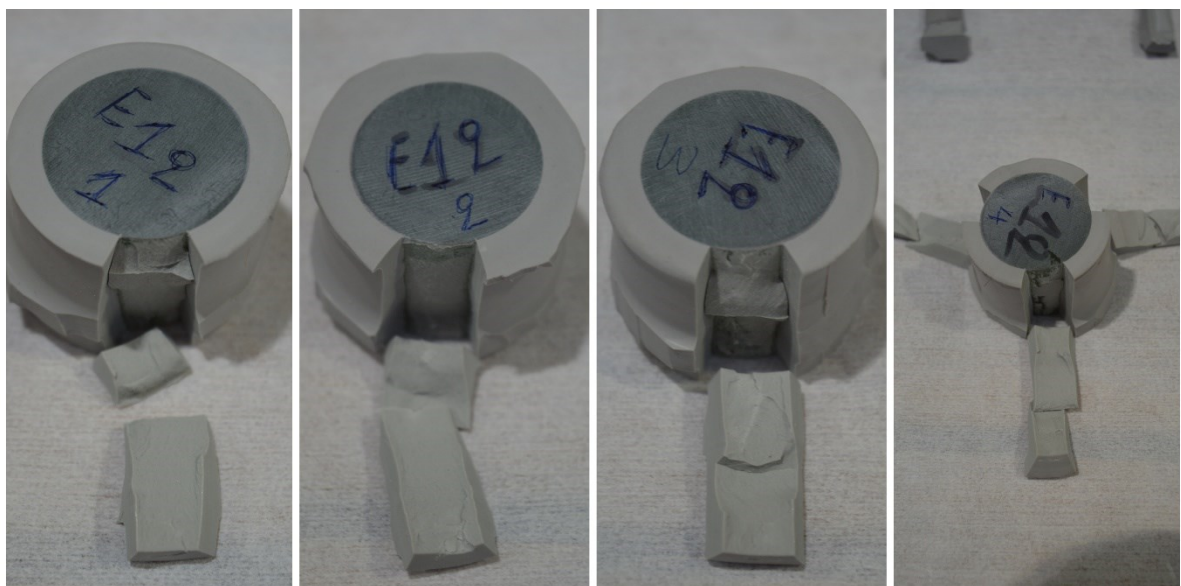
Σχήμα Δ - 14. Δοκίμια των μονωτήρων C2.



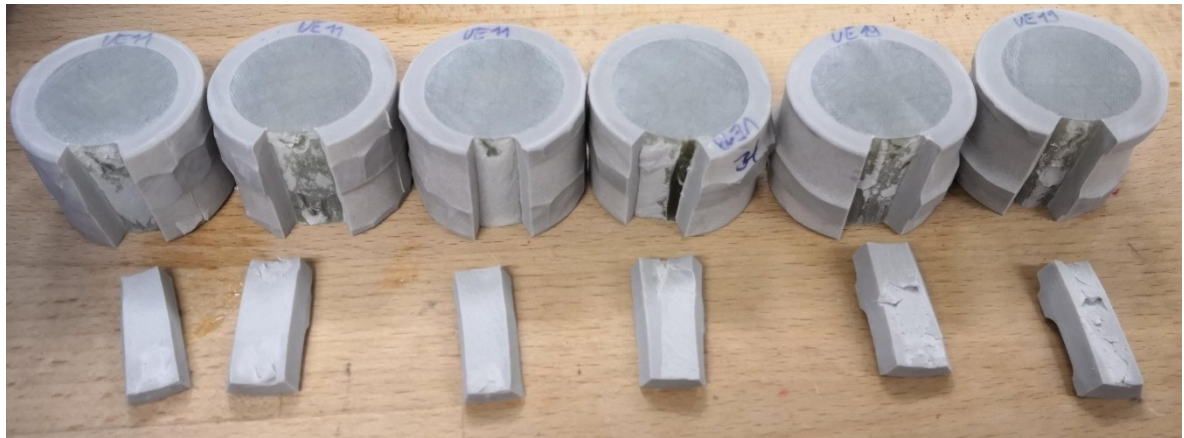
Σχήμα Δ - 15. Δοκίμια των μονωτήρων D1.



Σχήμα Δ - 16. Δοκίμια των μονωτήρων D2.



Σχήμα Δ - 17. Δοκίμια των μονωτήρων E1.



Σχήμα Δ - 18. Δοκίμια των μονωτήρων UE1.

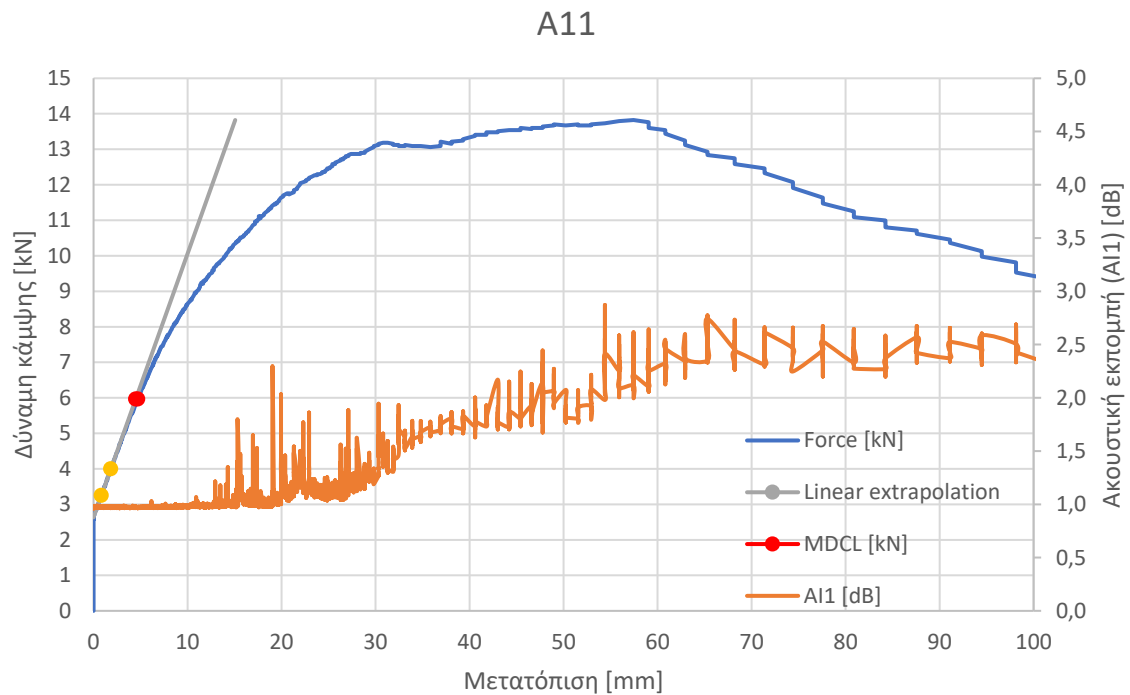


Σχήμα Δ - 19. Δοκίμια των μονωτήρων F1.

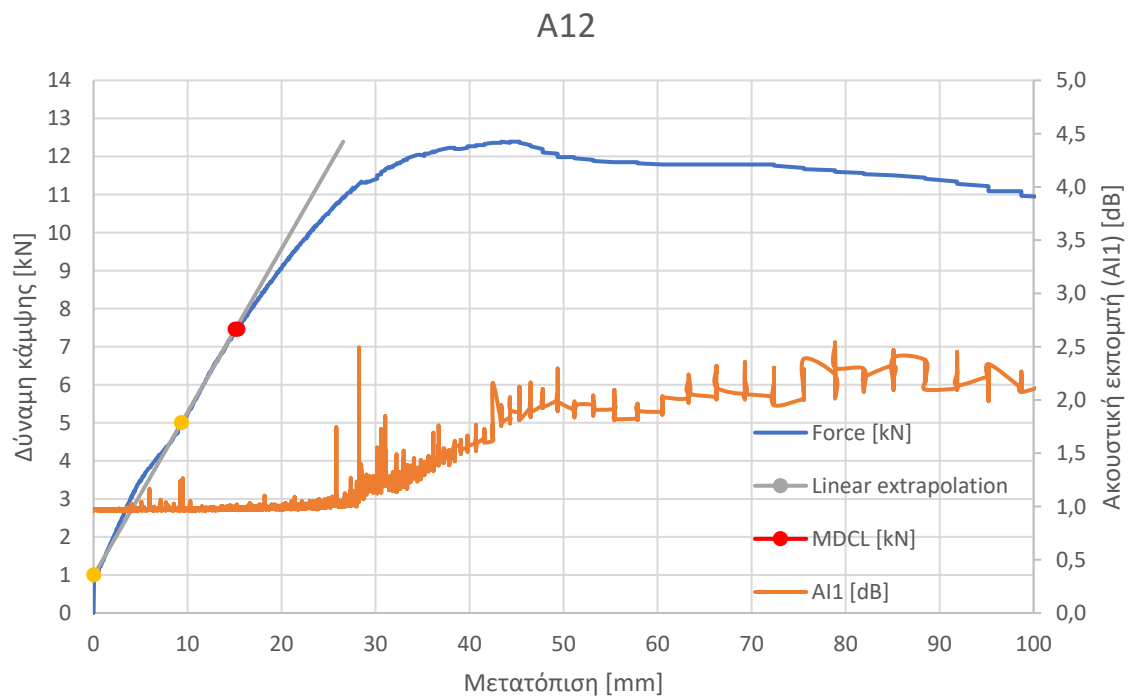
Παράρτημα Ε

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής κάμψης που πραγματοποιήθηκε σε καινούριους συνθετικούς μονωτήρες στήριξης των κατασκευαστών Α, C και D (σχήματα Ε-1 έως Ε-44). Η δοκιμή αυτή δεν πραγματοποιήθηκε σε μονωτήρες από τους υπόλοιπους κατασκευαστές καθώς οι μονωτήρες αυτοί δεν επαρκούσαν σε αριθμό. Τα αποτελέσματα της δοκιμής κάμψης παρουσιάζονται σε μορφή διαγραμμάτων στα οποία απεικονίζονται η δύναμη κάμψης, που ασκούνταν γρήγορα αλλά ομαλά στους μονωτήρες στήριξης (σε kN), η ακουστική εκπομπή, που λάμβανε ο αισθητήρας, που ήταν τοποθετημένος στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη των μονωτήρων (σε dB) και η μετατόπιση του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του (σε mm). Επίσης, στα συγκεκριμένα διαγράμματα παρουσιάζεται το σημείο (κόκκινη βούλα) στο οποίο ο μονωτήρας αρχίζει να μην έχει πλέον ελαστική συμπεριφορά αλλά να αποκτά πλαστική συμπεριφορά (δηλαδή αρχίζει να έχει μόνιμη παραμόρφωση – δεν επανέρχεται στην αρχική του θέση μετά τη δοκιμή), όπως εξηγήθηκε στο σχήμα 2-50 του υποκεφαλαίου 2.3.2. Εκείνο το σημείο σύμφωνα με την πηγή [29] ταυτίζεται με την τιμή της παραμέτρου MDCL των συνθετικών μονωτήρων στήριξης και το οποίο επαληθεύεται μέσω αυτής της διδακτορικής διατριβής και της μεγάλης ποσότητας μονωτήρων που εξετάστηκαν σχετικά με αυτό το θέμα.

Συνθετικοί μονωτήρες στήριξης του κατασκευαστή A

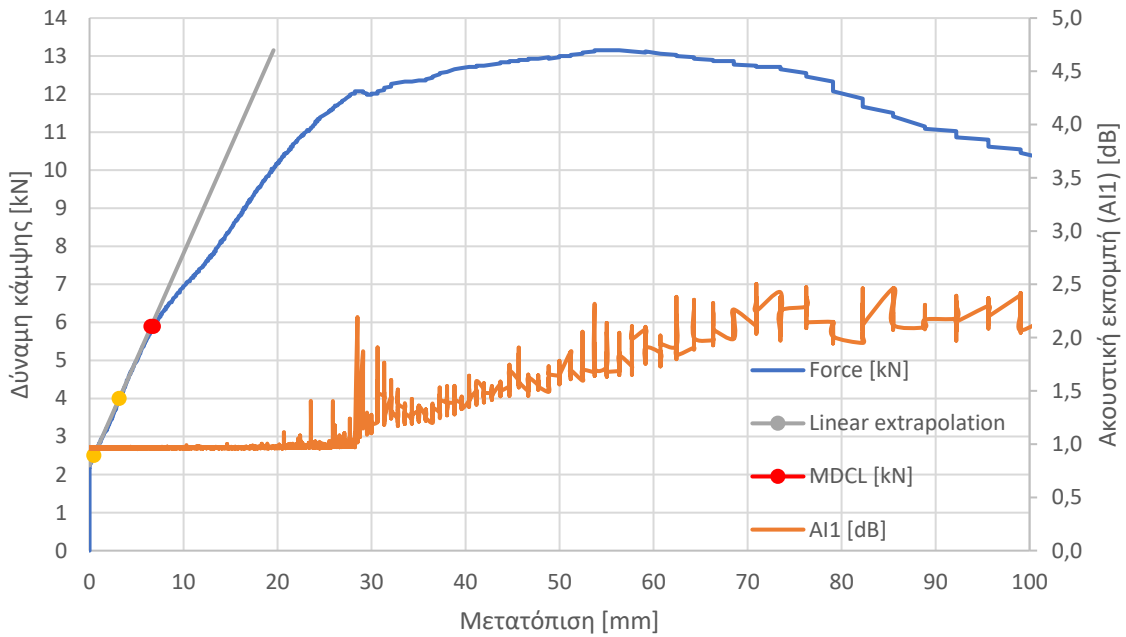


Σχήμα Ε - 1. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα A11 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσει της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.



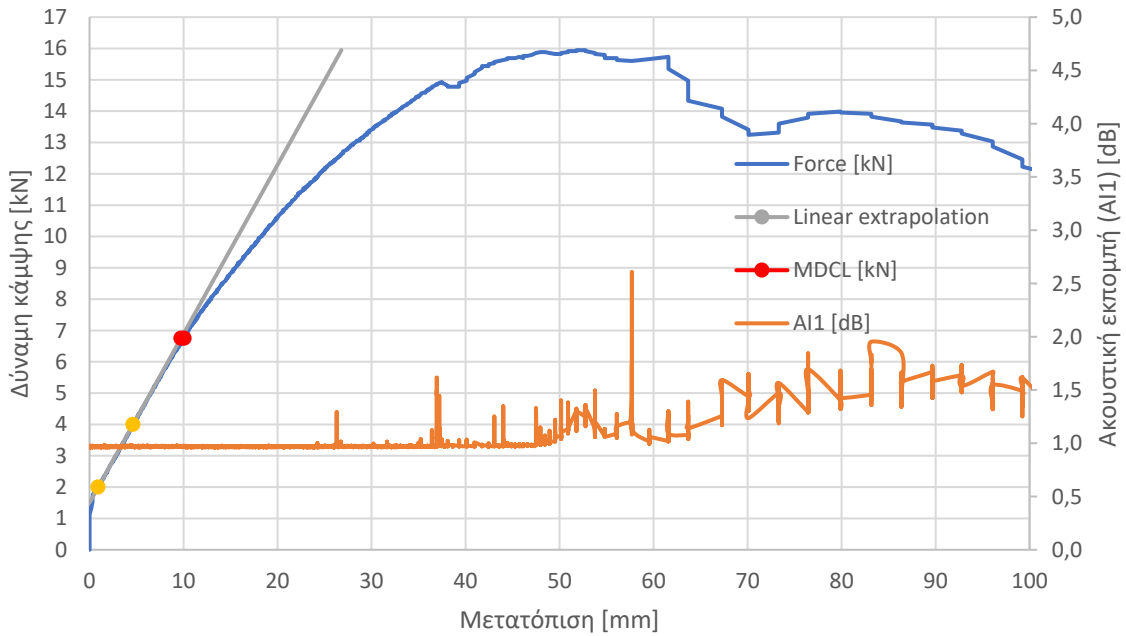
Σχήμα Ε - 2. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα A12 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσει της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.

A13

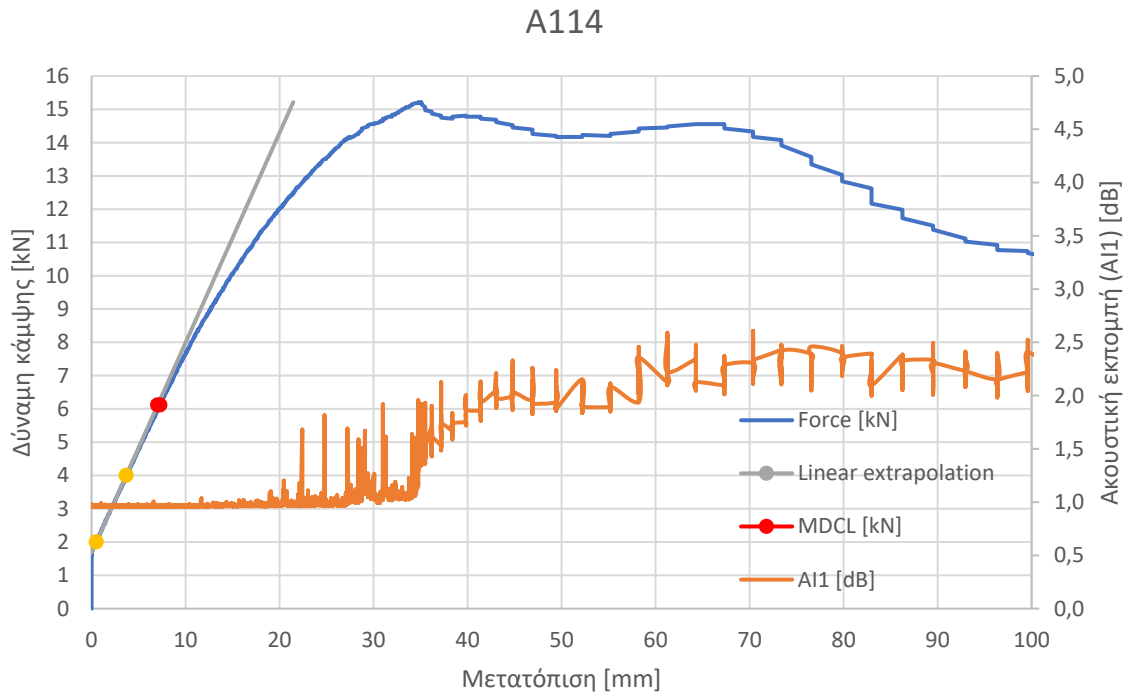


Σχήμα Ε - 3. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα A13 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.

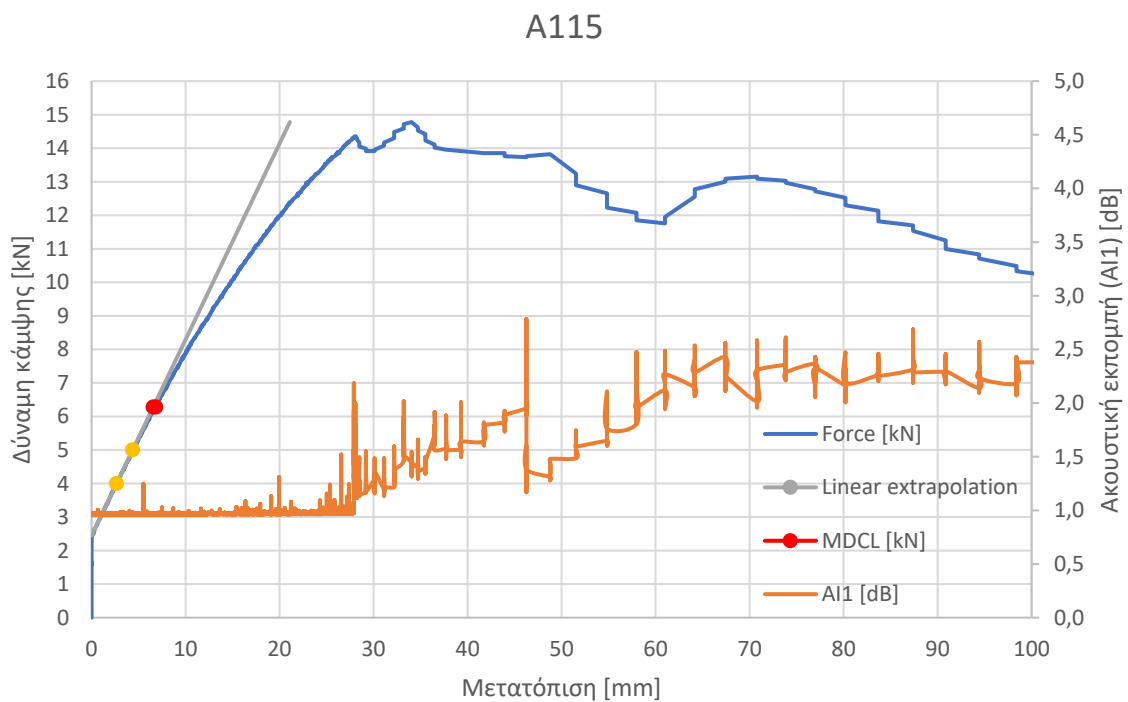
A111



Σχήμα Ε - 4. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα A111 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.

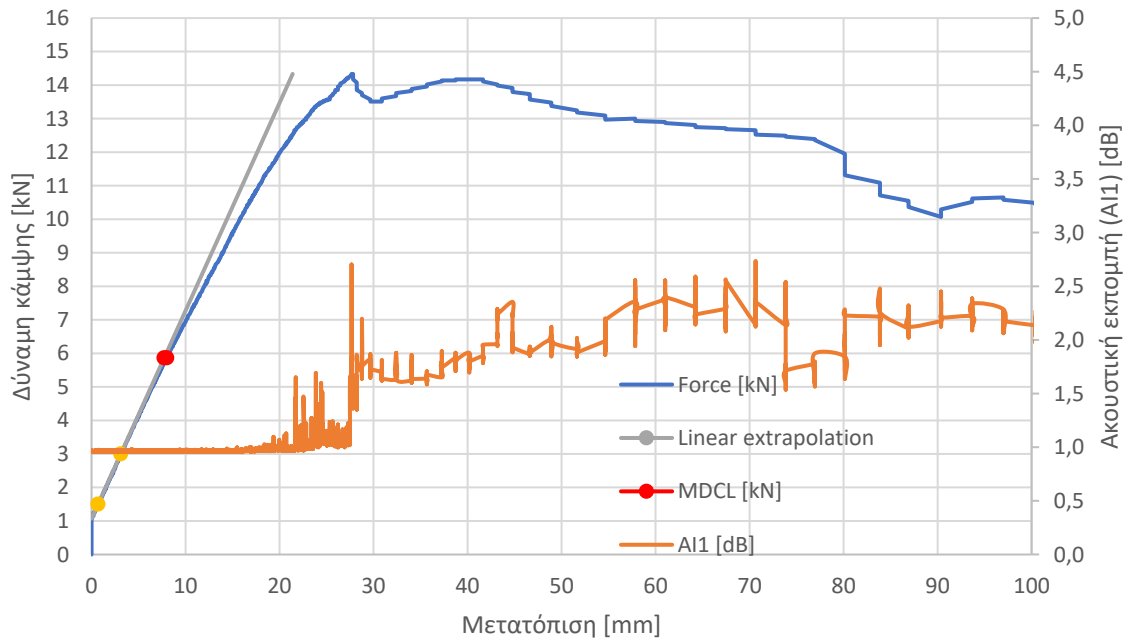


Σχήμα Ε - 5. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα A114 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.



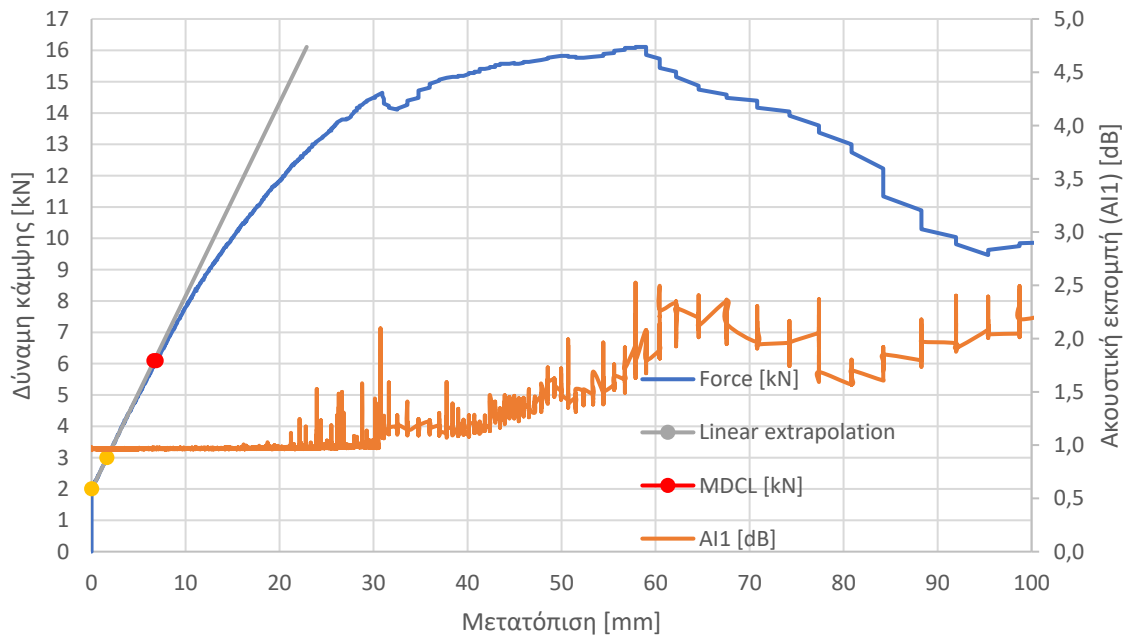
Σχήμα Ε - 6. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα A115 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.

A116

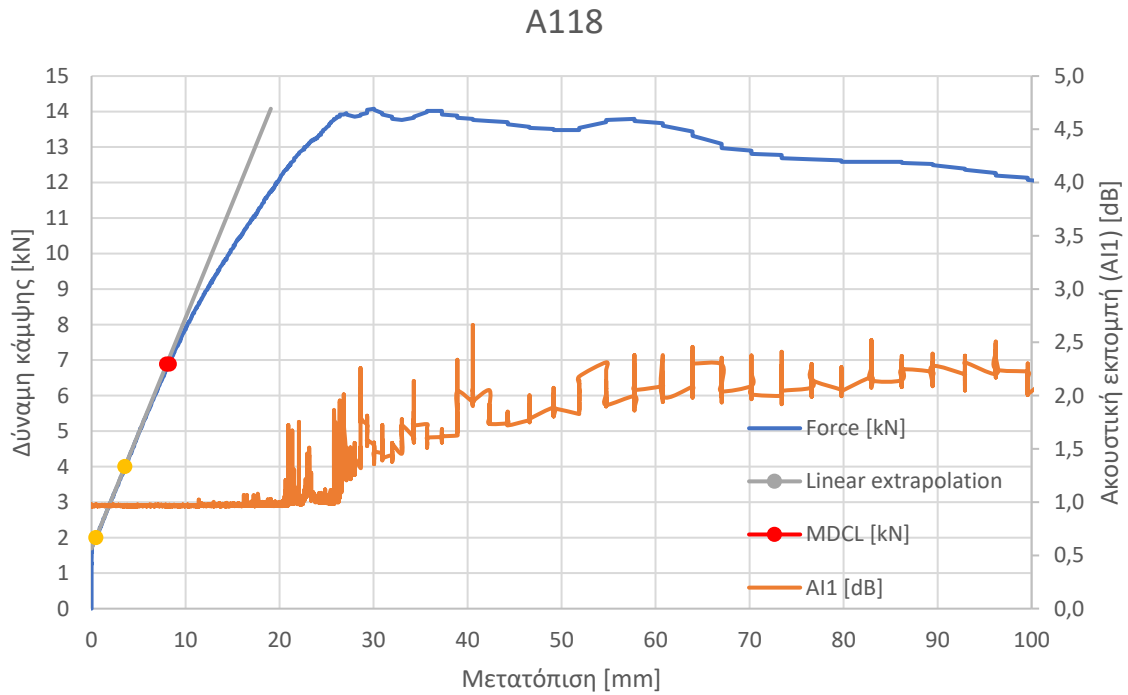


Σχήμα Ε - 7. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα A116 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.

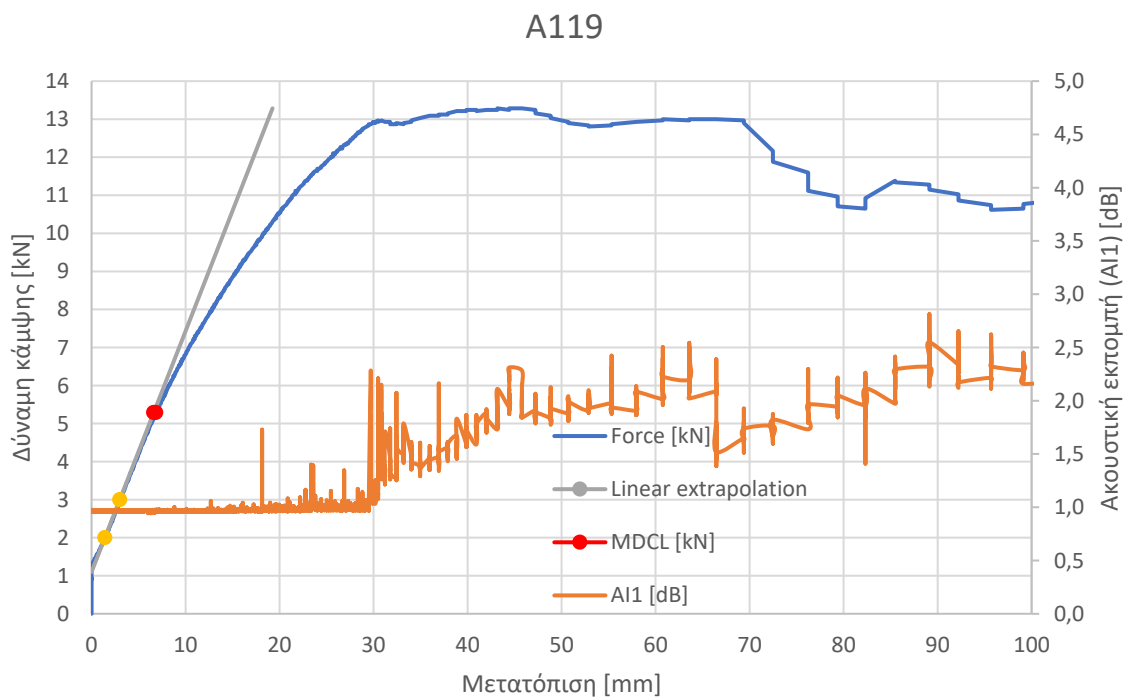
A117



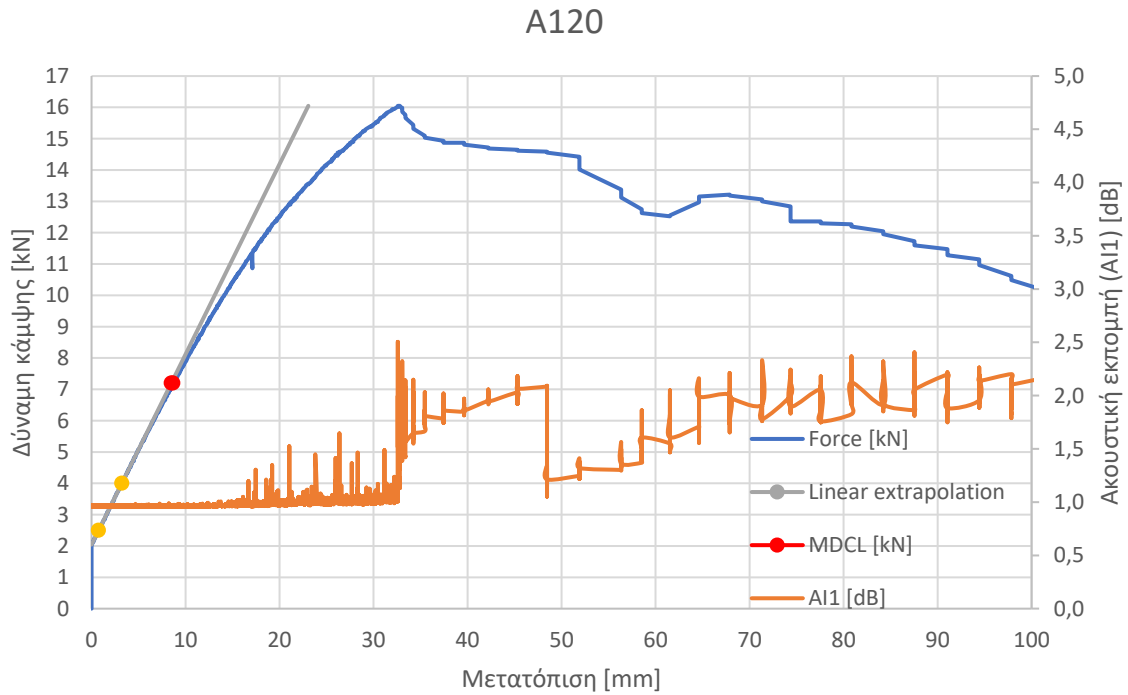
Σχήμα Ε - 8. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα A117 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.



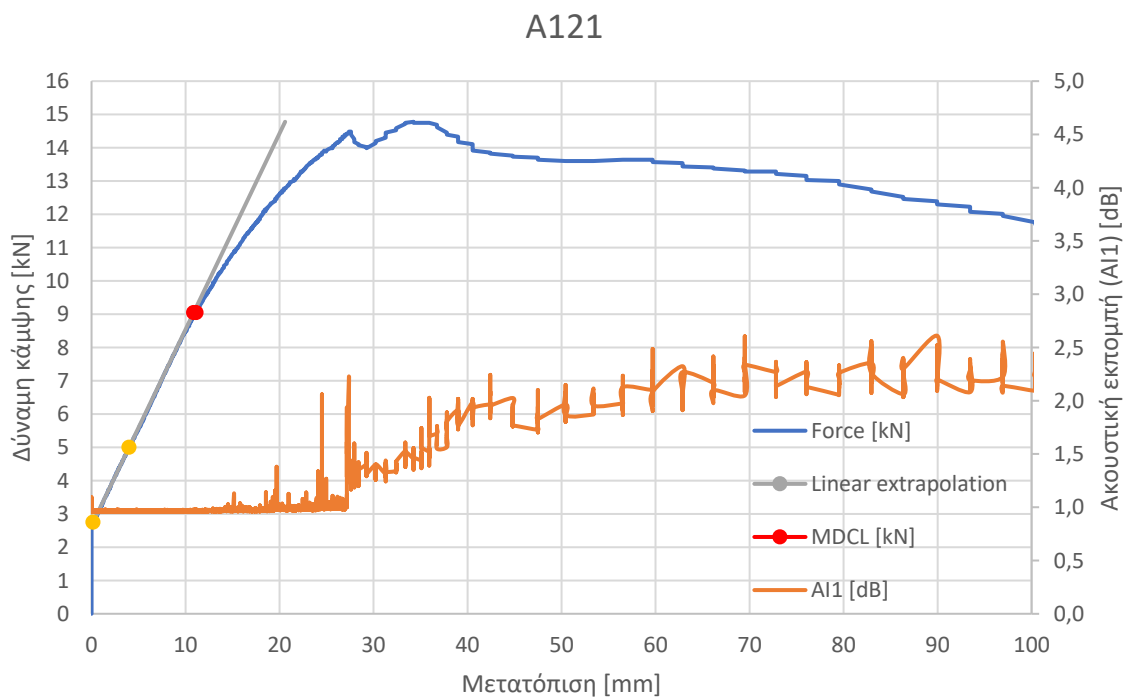
Σχήμα Ε - 9. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα A118 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.



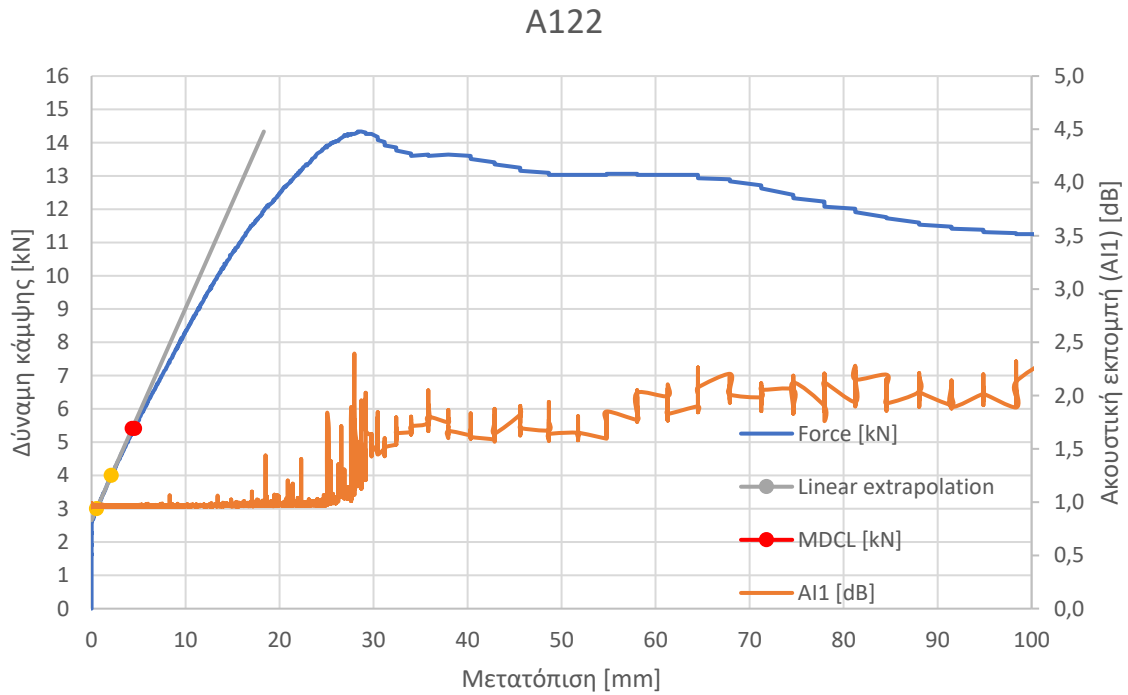
Σχήμα Ε - 10. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα A119 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.



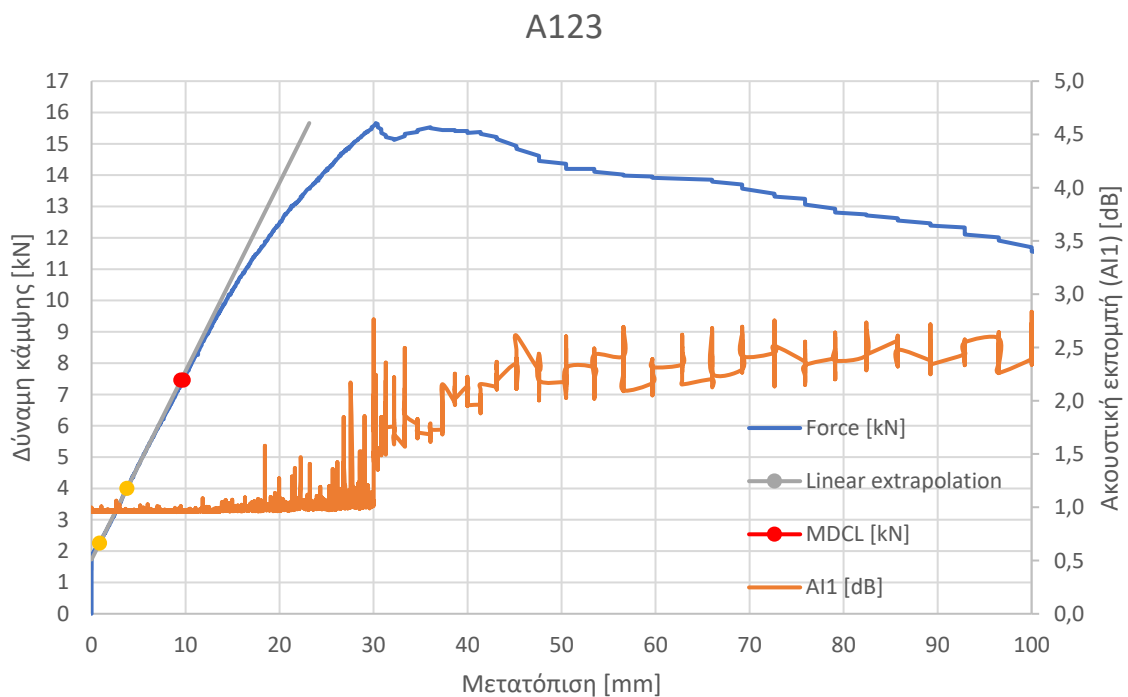
Σχήμα Ε - 11. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα A120 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.



Σχήμα Ε - 12. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα A121 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.

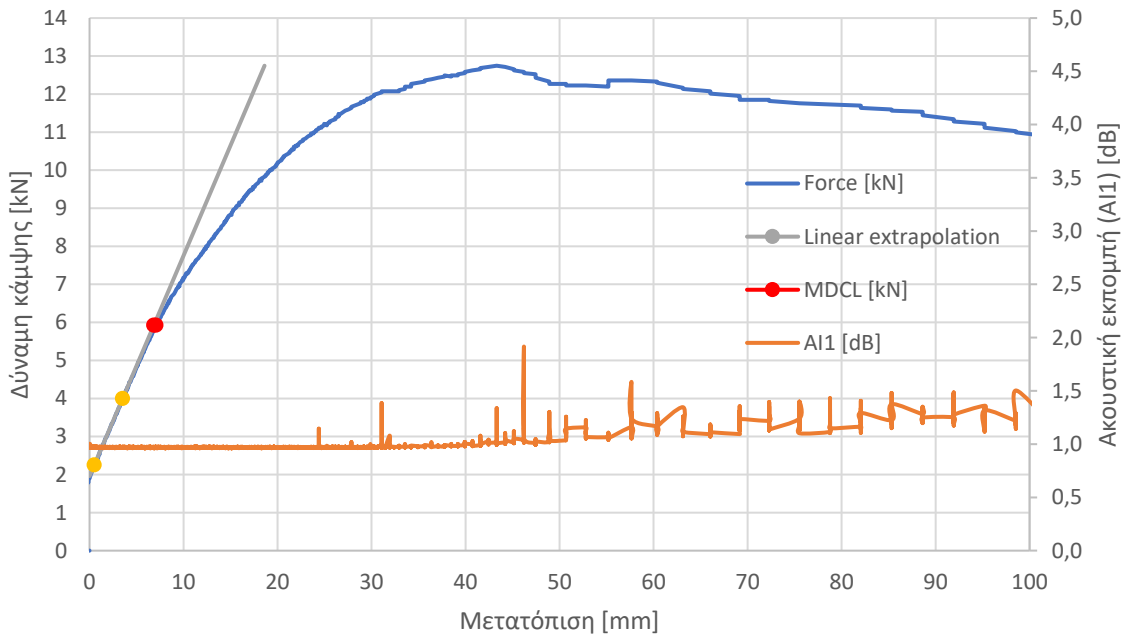


Σχήμα Ε - 13. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα A122 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.



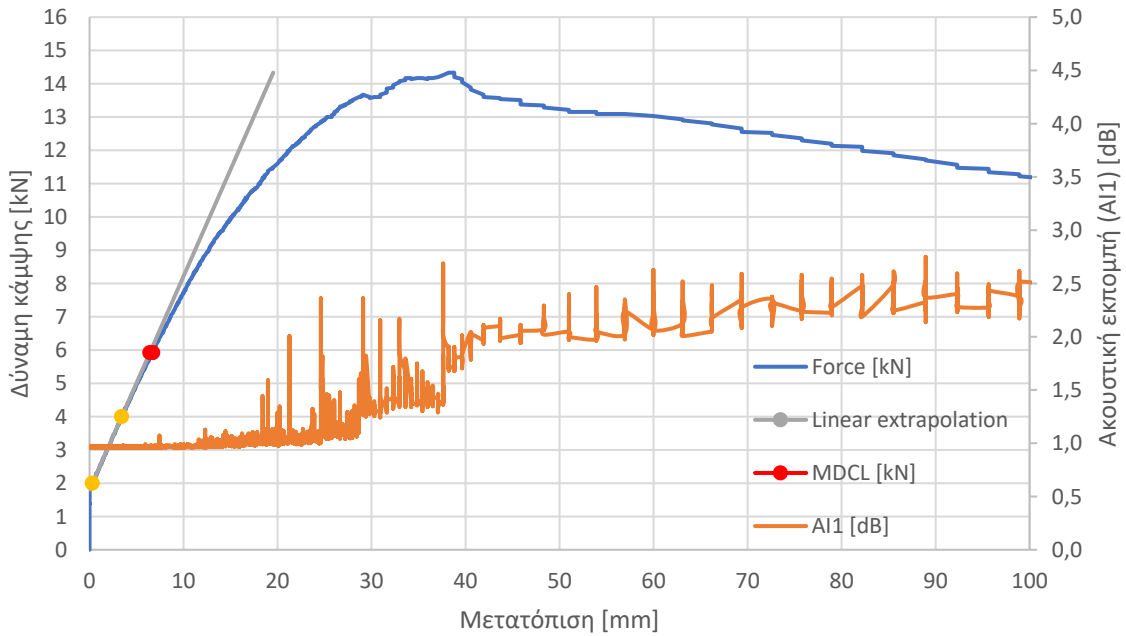
Σχήμα Ε - 14. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα A123 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.

A124

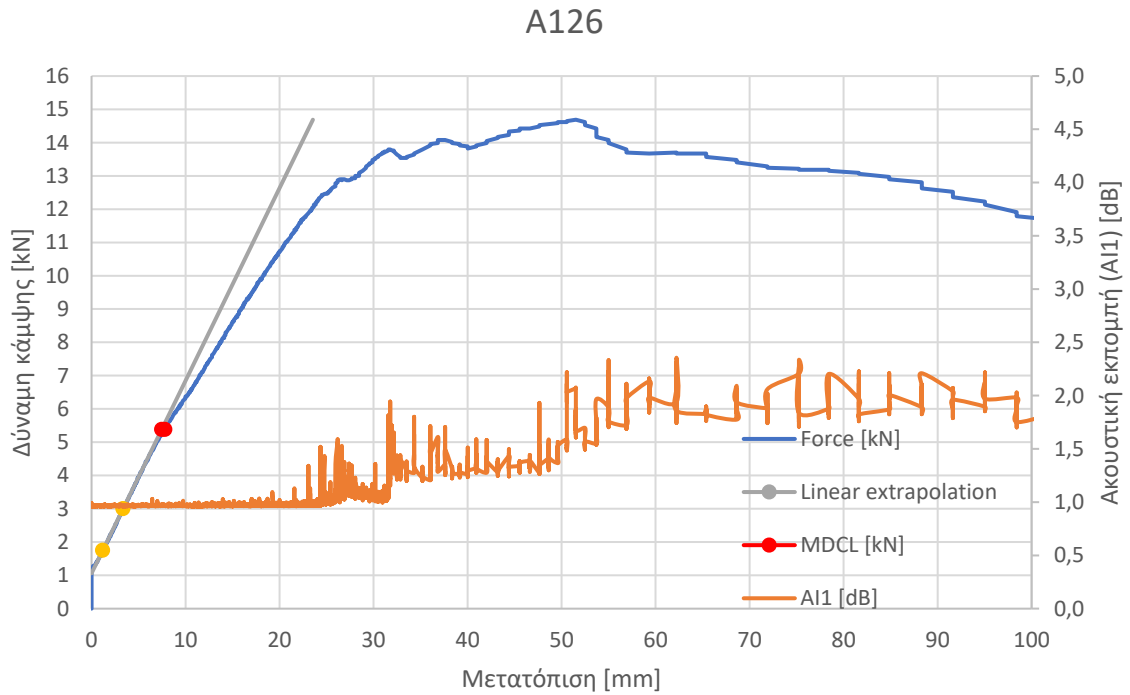


Σχήμα Ε - 15. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα A124 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.

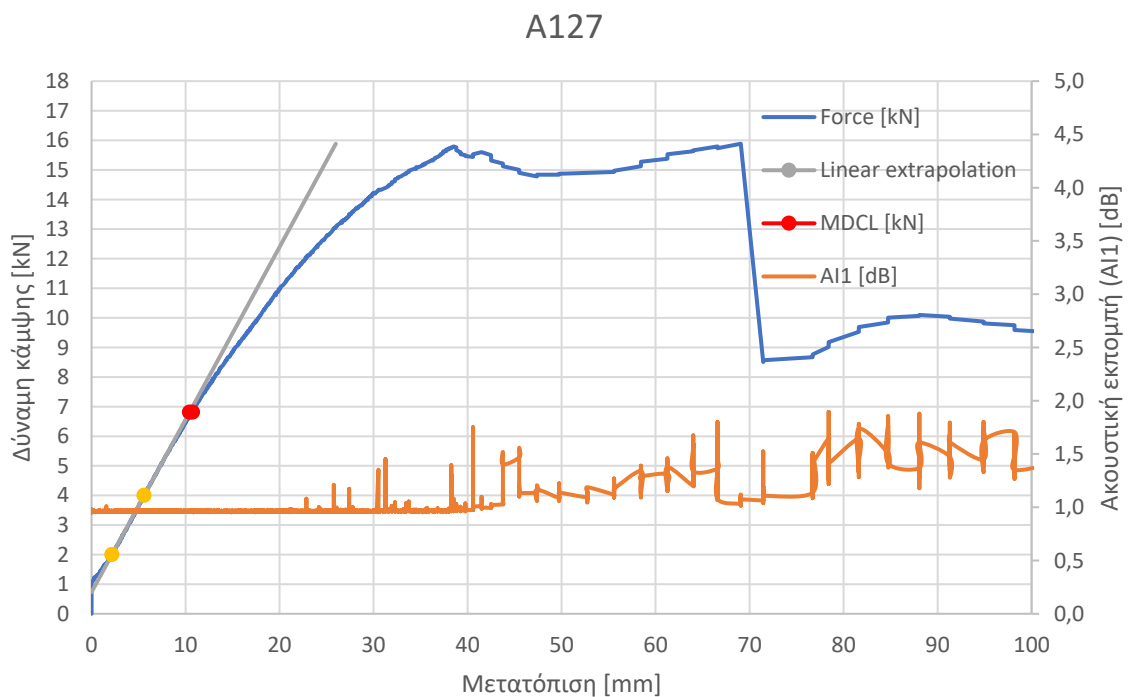
A125



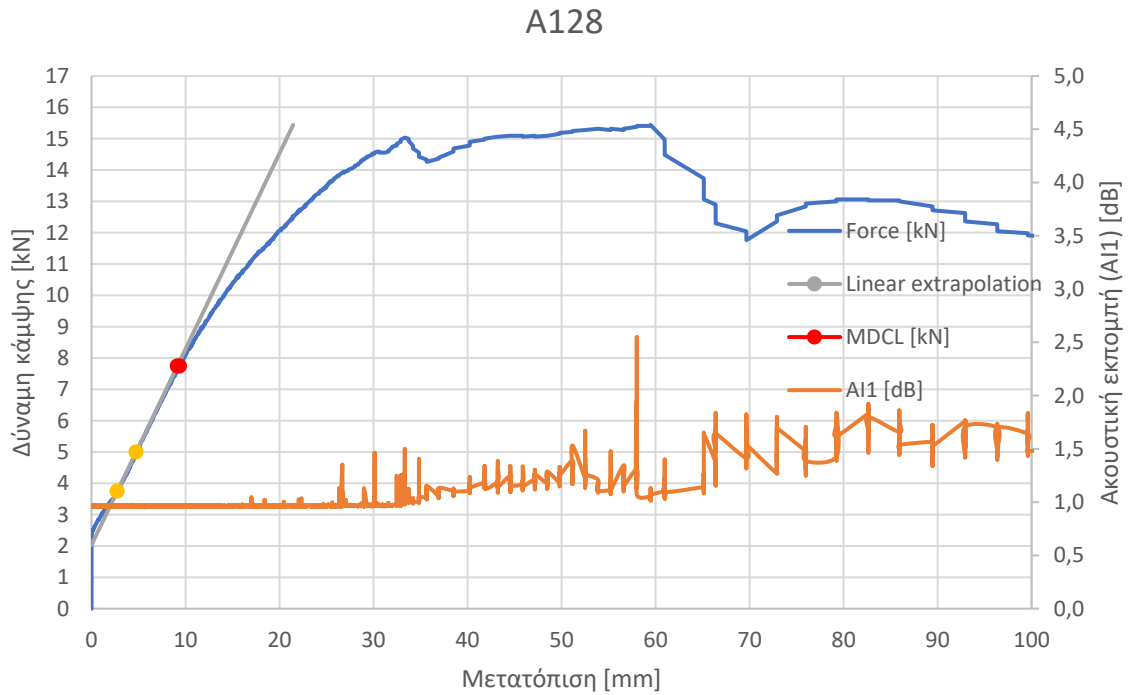
Σχήμα Ε - 16. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα A125 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.



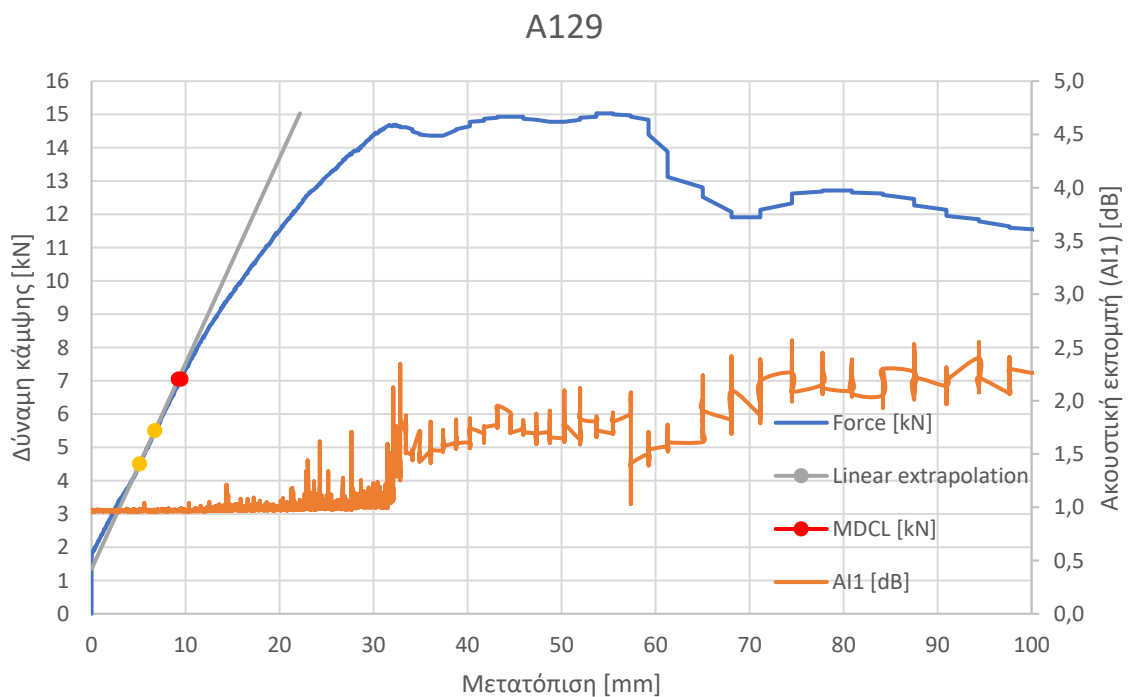
Σχήμα Ε - 17. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα A126 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσει της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.



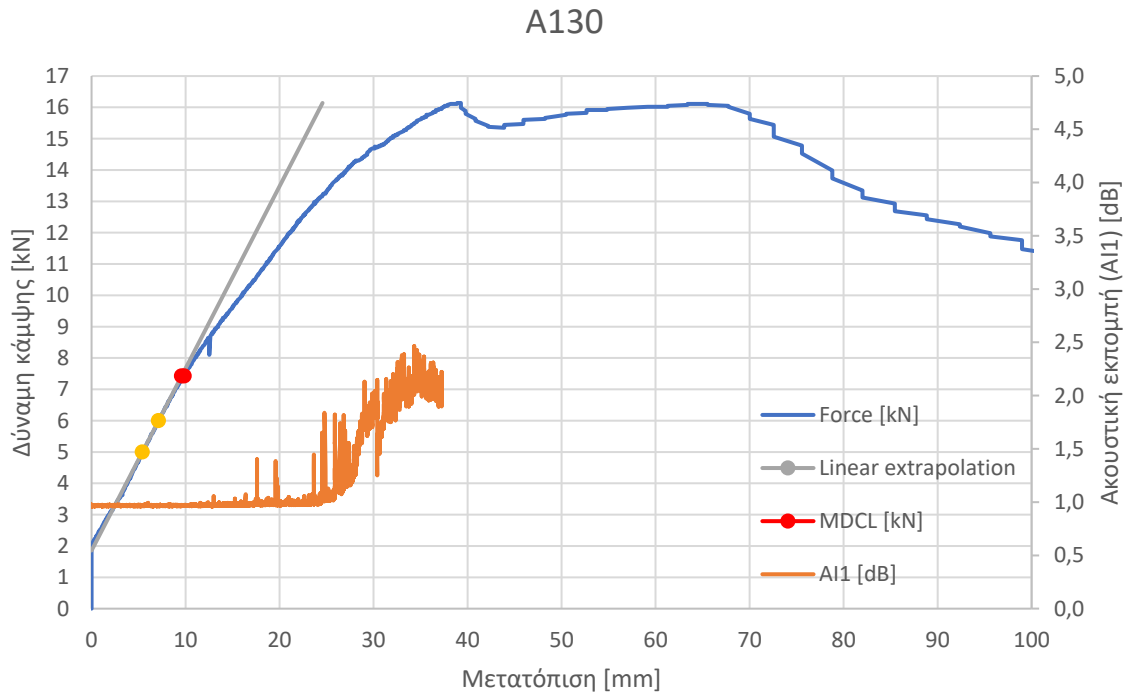
Σχήμα Ε - 18. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα A127 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσει της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.



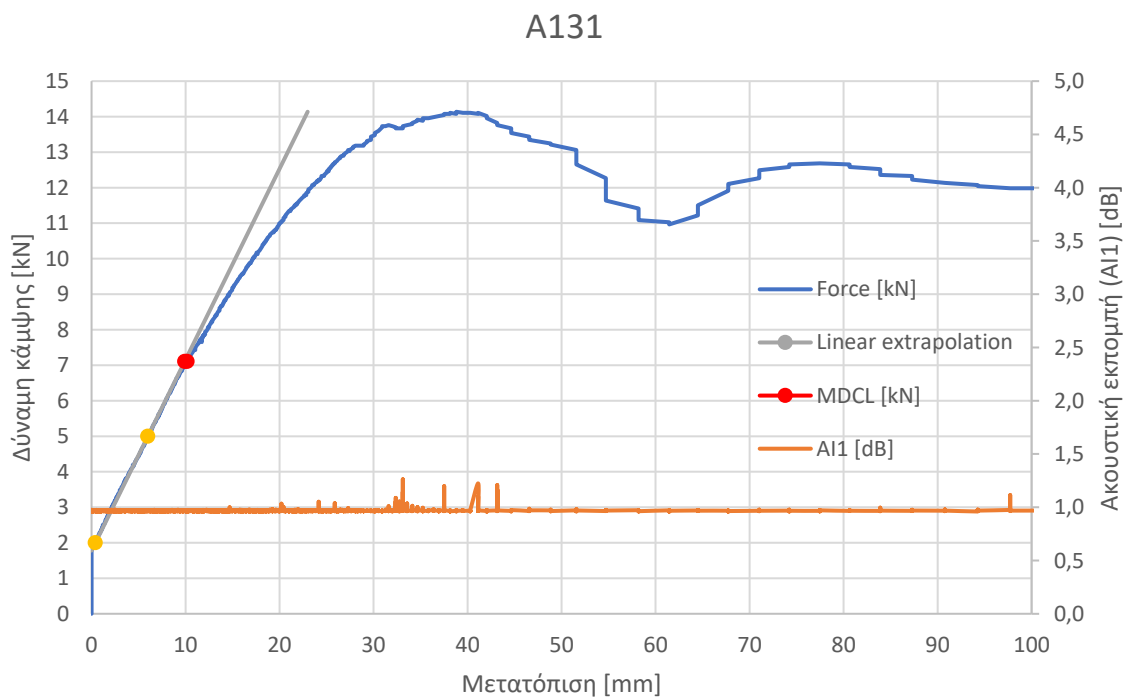
Σχήμα Ε - 19. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα A128 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσει της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.



Σχήμα Ε - 20. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα A129 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσει της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.

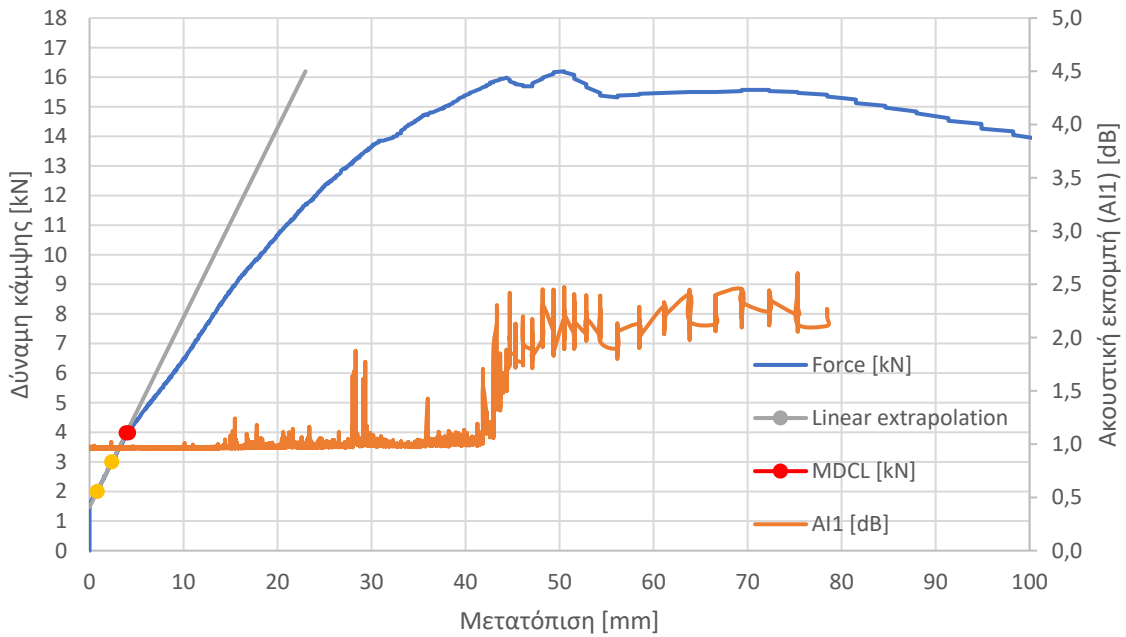


Σχήμα Ε - 21. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα A130 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.



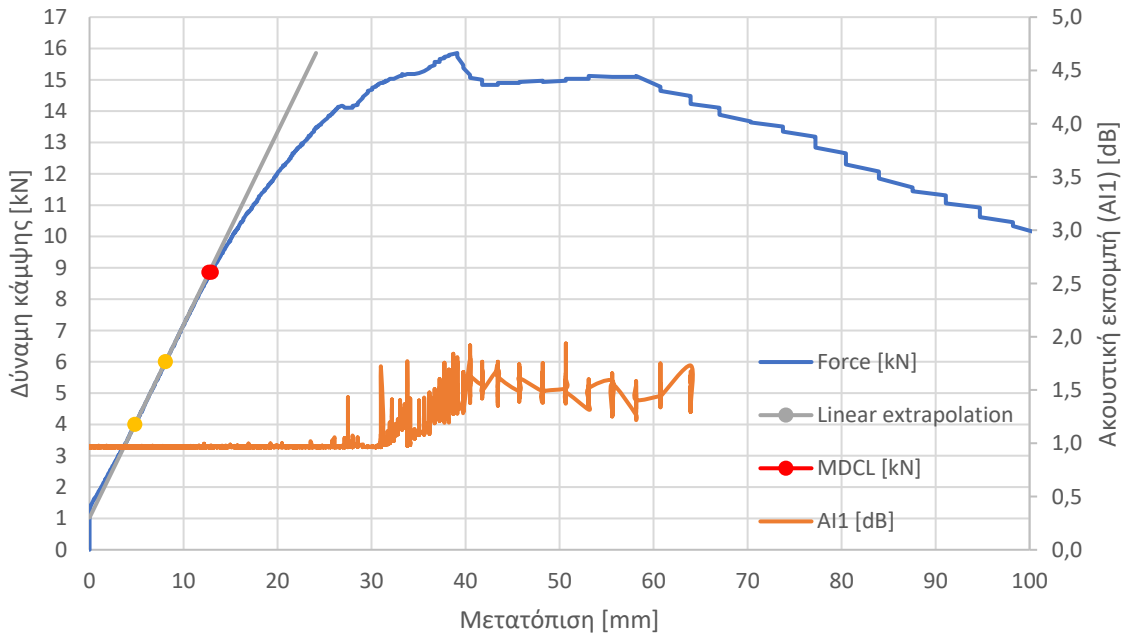
Σχήμα Ε - 22. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα A131 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.

A132

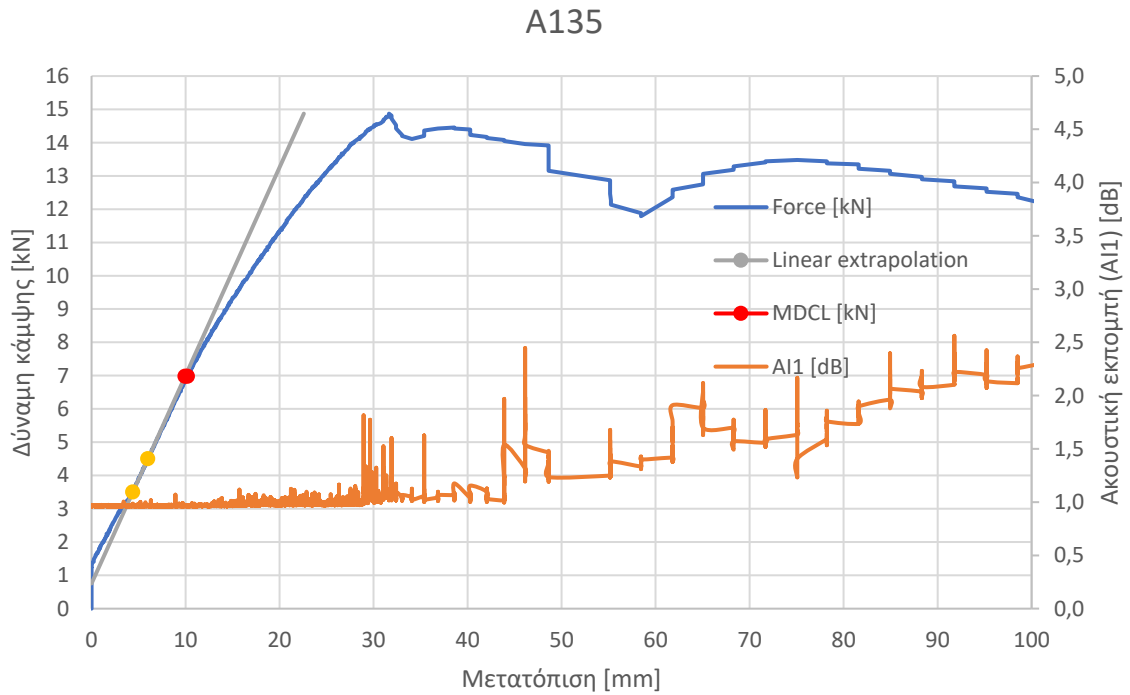


Σχήμα Ε - 23. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα A132 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.

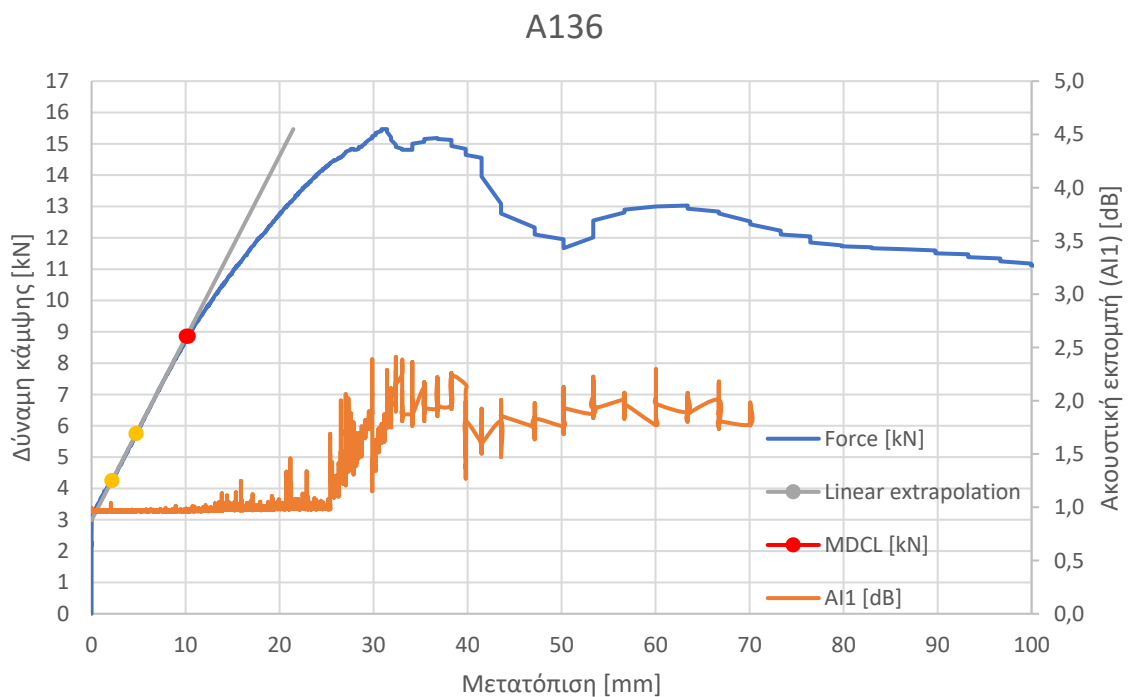
A134



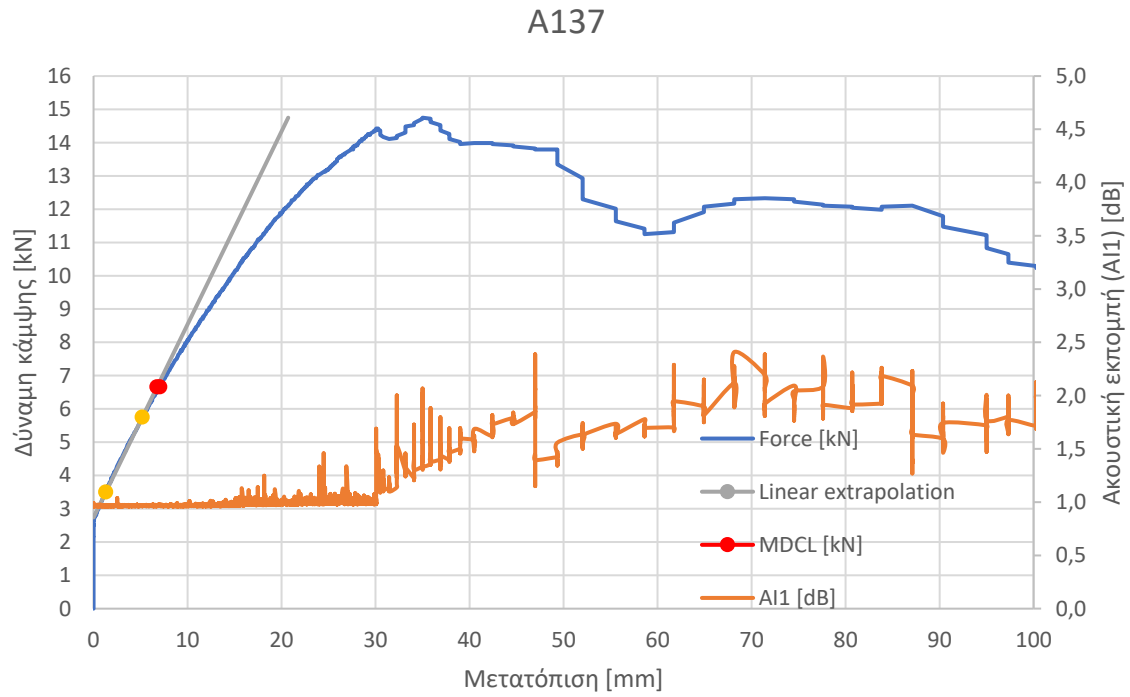
Σχήμα Ε - 24. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα A134 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.



Σχήμα Ε - 25. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα A135 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.

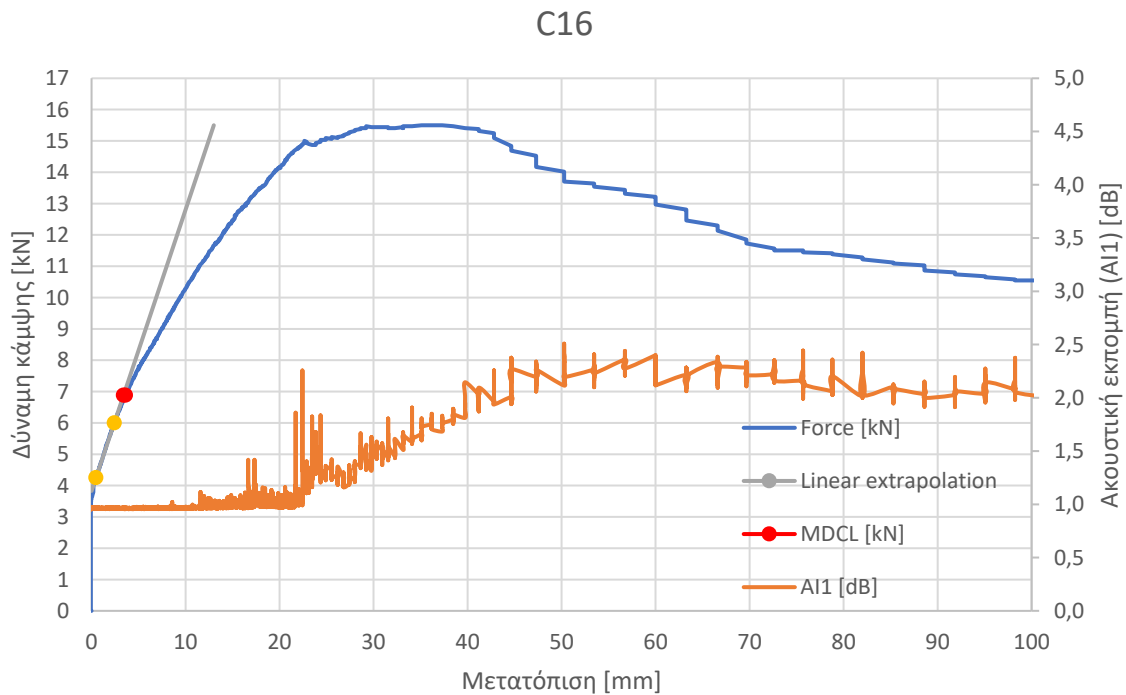


Σχήμα Ε - 26. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα A136 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.

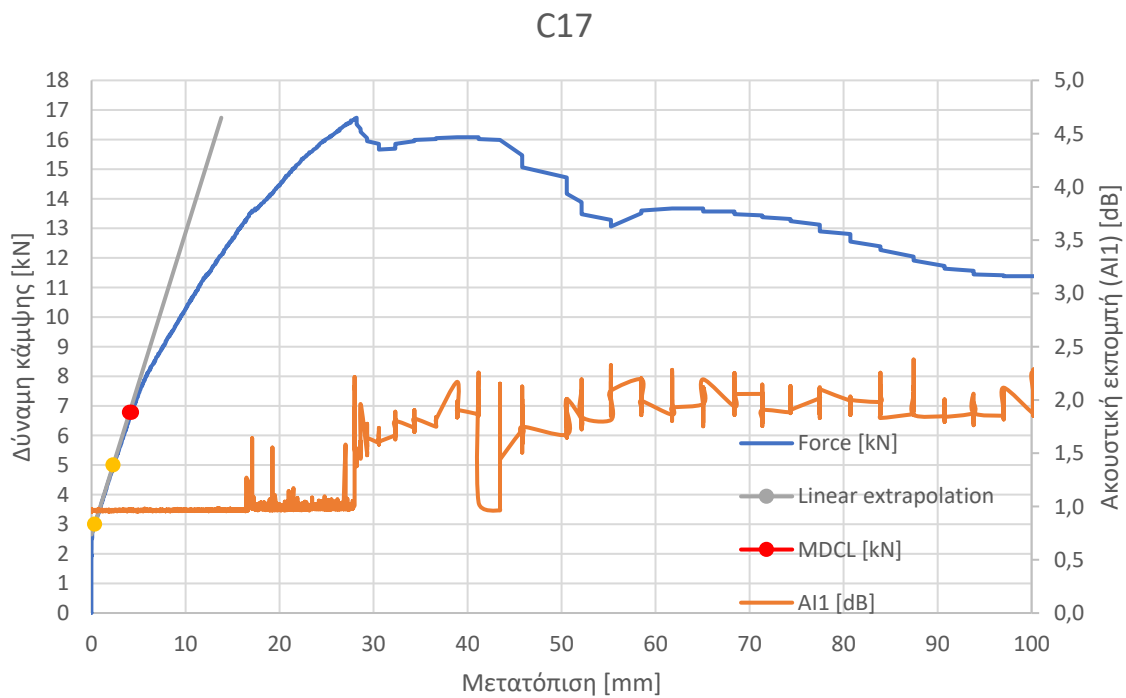


Σχήμα Ε - 27. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα A137 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσει της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.

Συνθετικοί μονωτήρες στήριξης του κατασκευαστή C

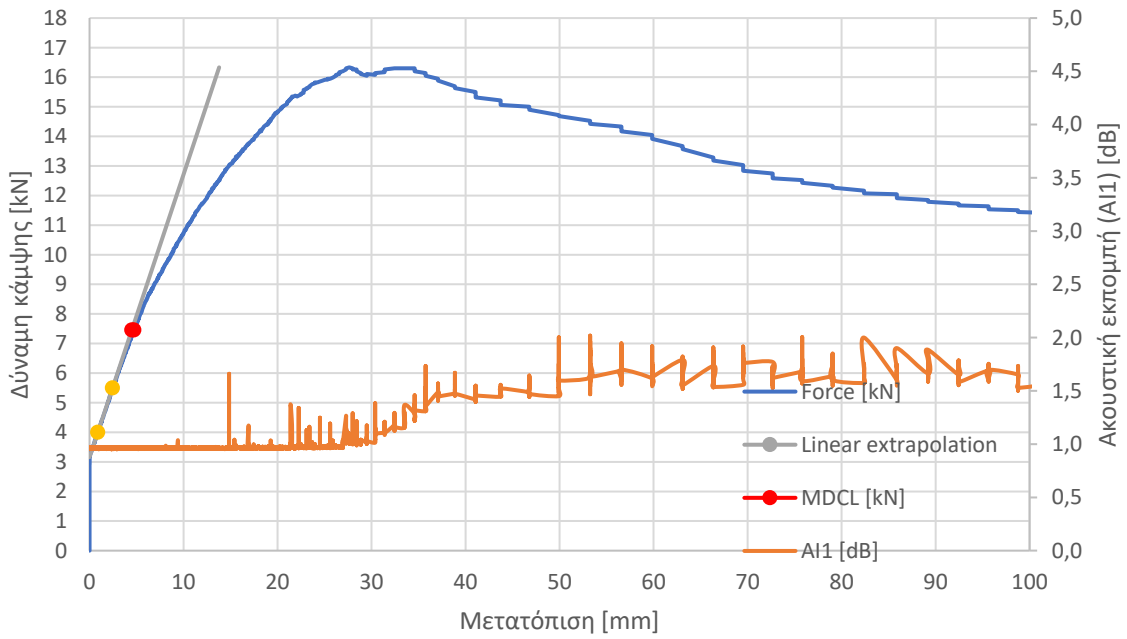


Σχήμα E - 28. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα C16 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσει της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.



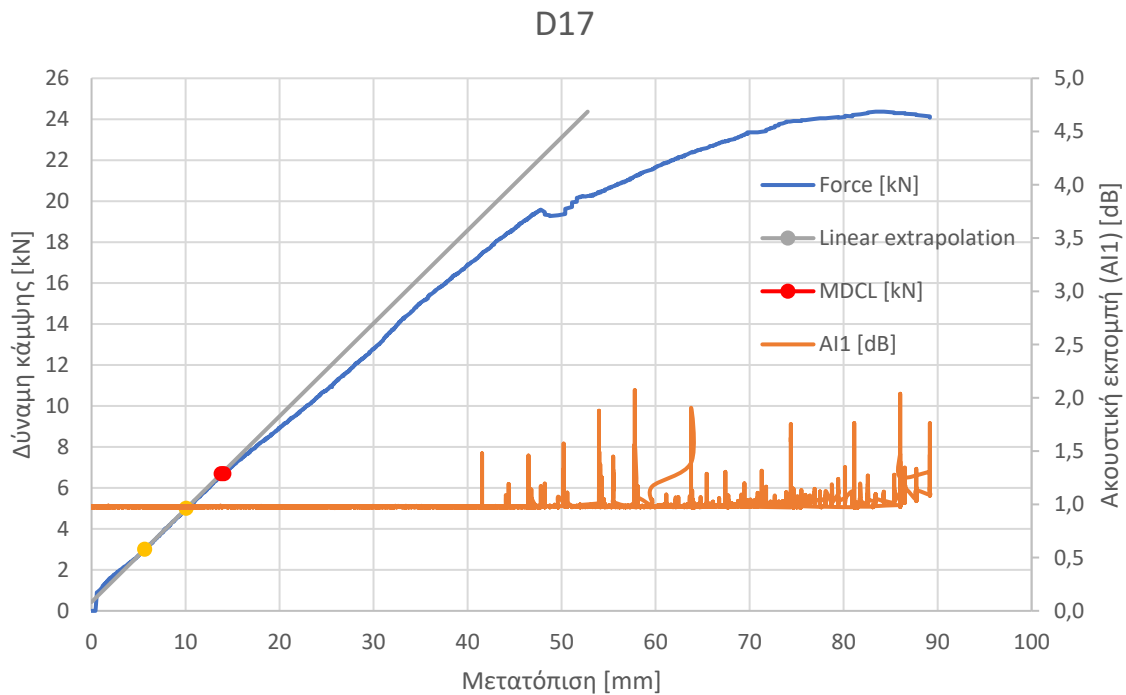
Σχήμα E - 29. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα C17 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσει της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.

C18

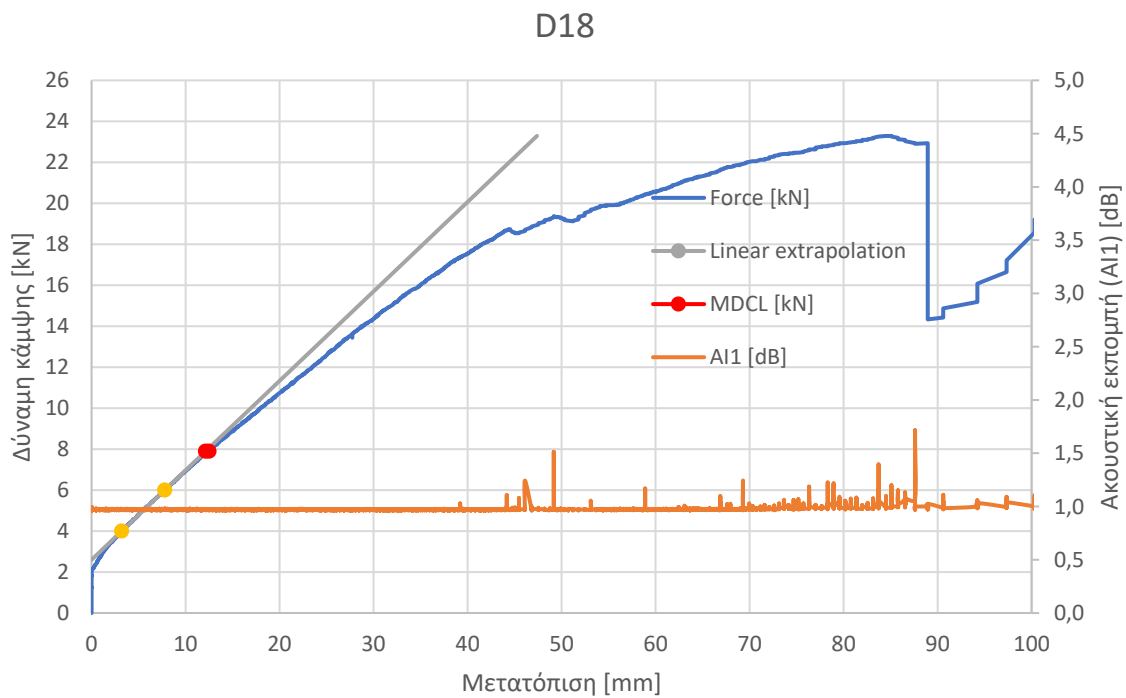


Σχήμα Ε - 30. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα C18 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσει της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.

Συνθετικοί μονωτήρες στήριξης του κατασκευαστή D

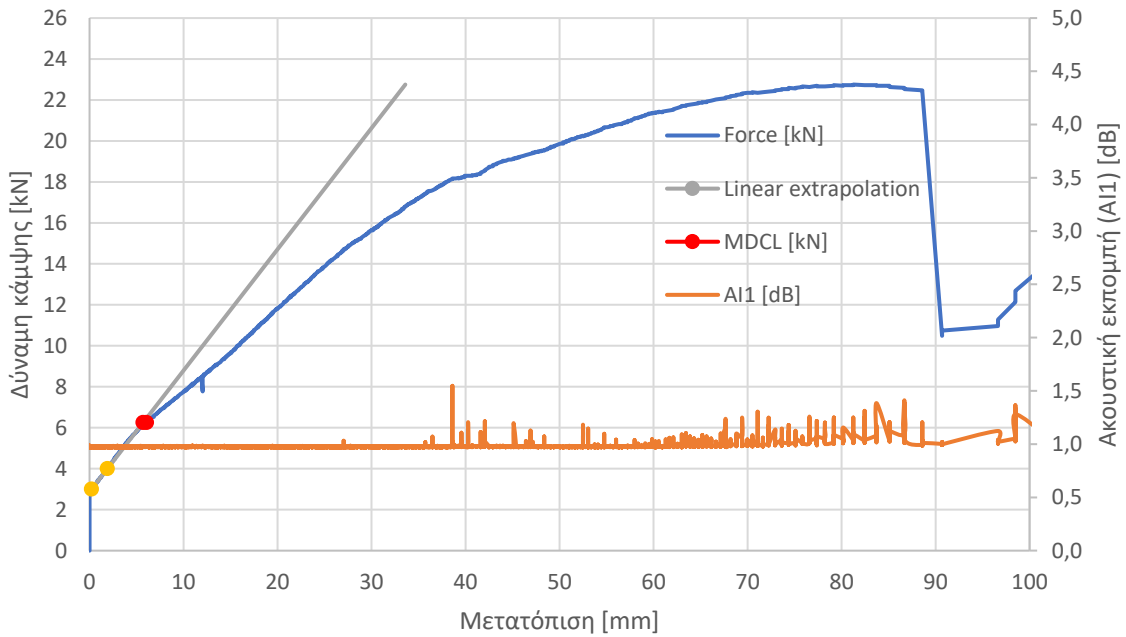


Σχήμα Ε - 31. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα D17 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσε της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.



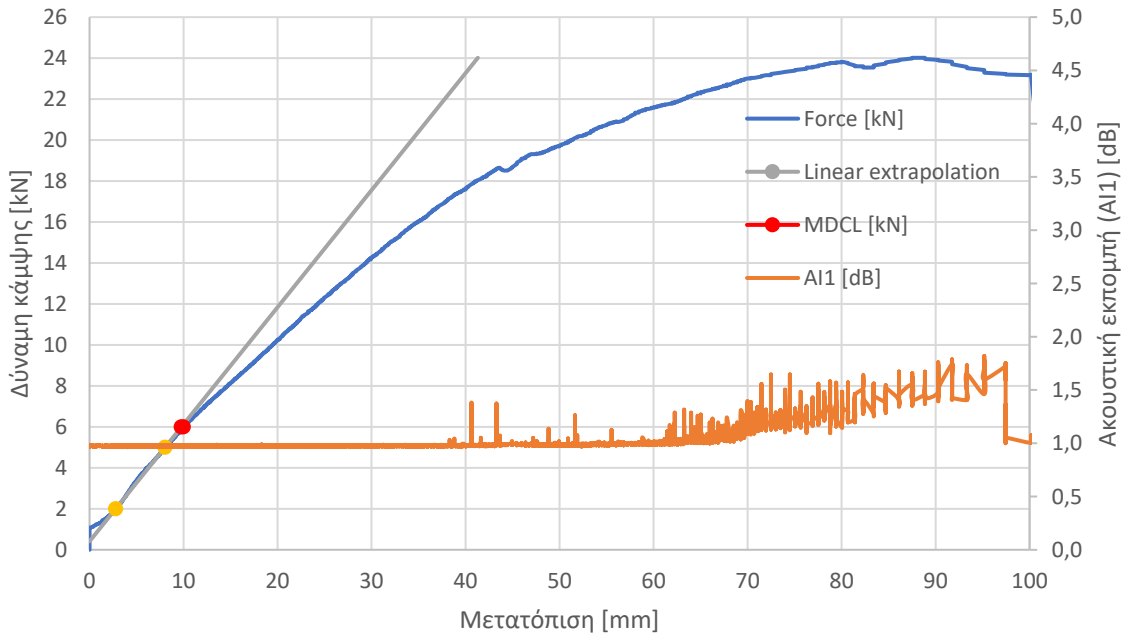
Σχήμα Ε - 32. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα D18 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσε της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.

D19

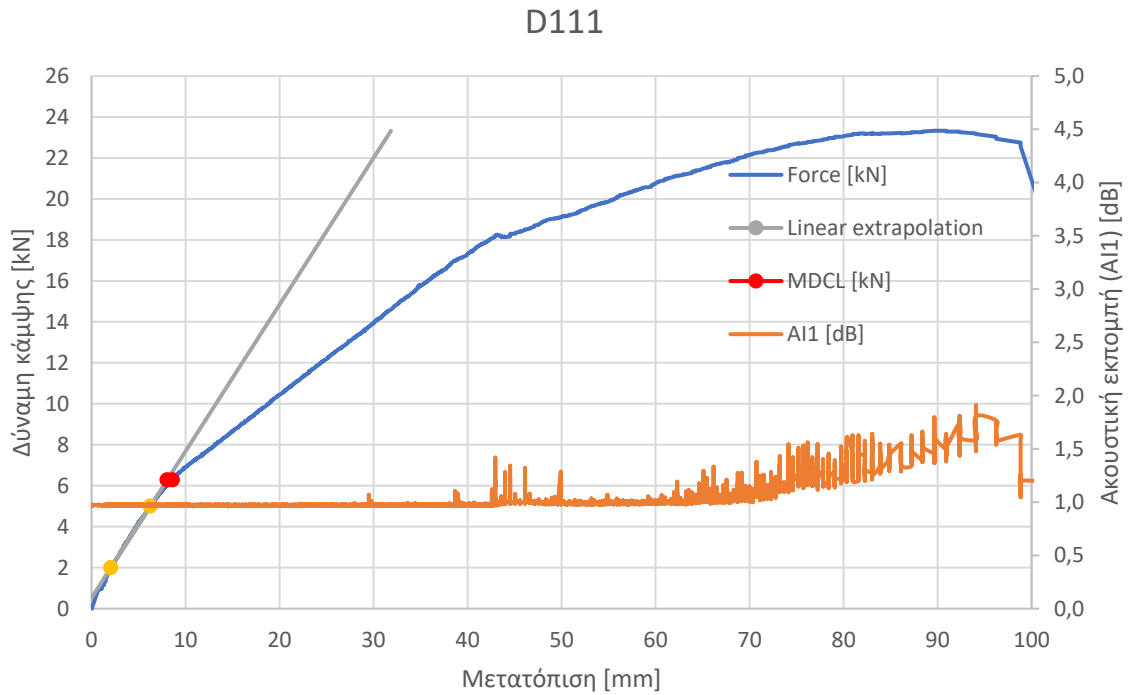


Σχήμα Ε - 33. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα D19 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.

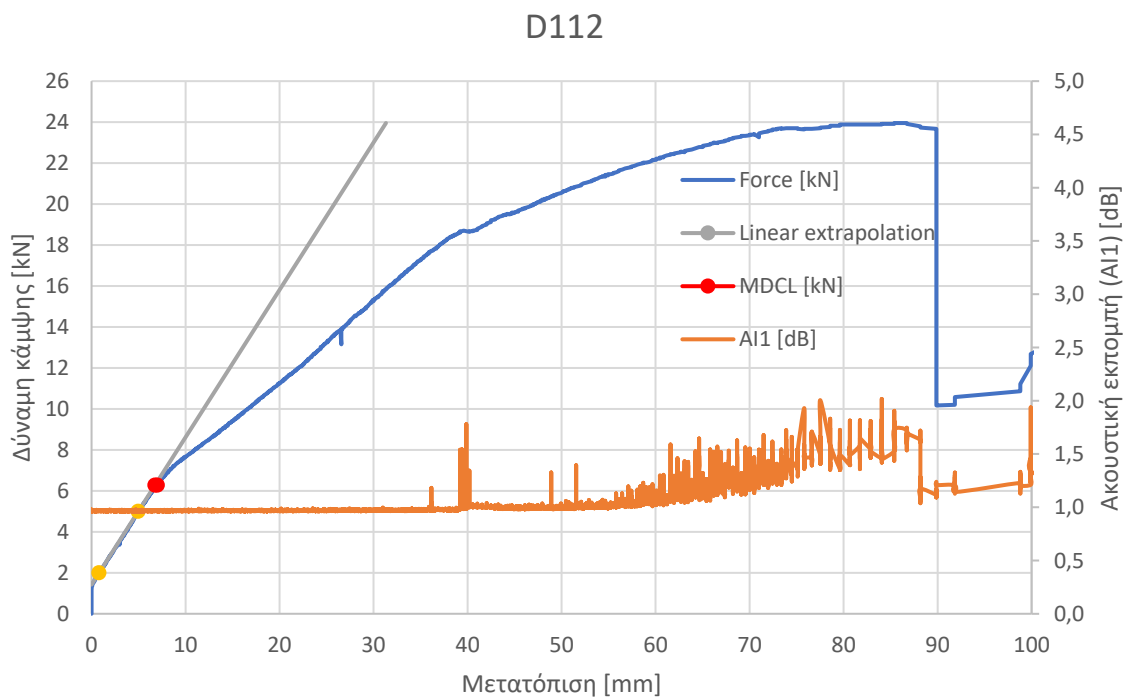
D110



Σχήμα Ε - 34. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα D110 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.

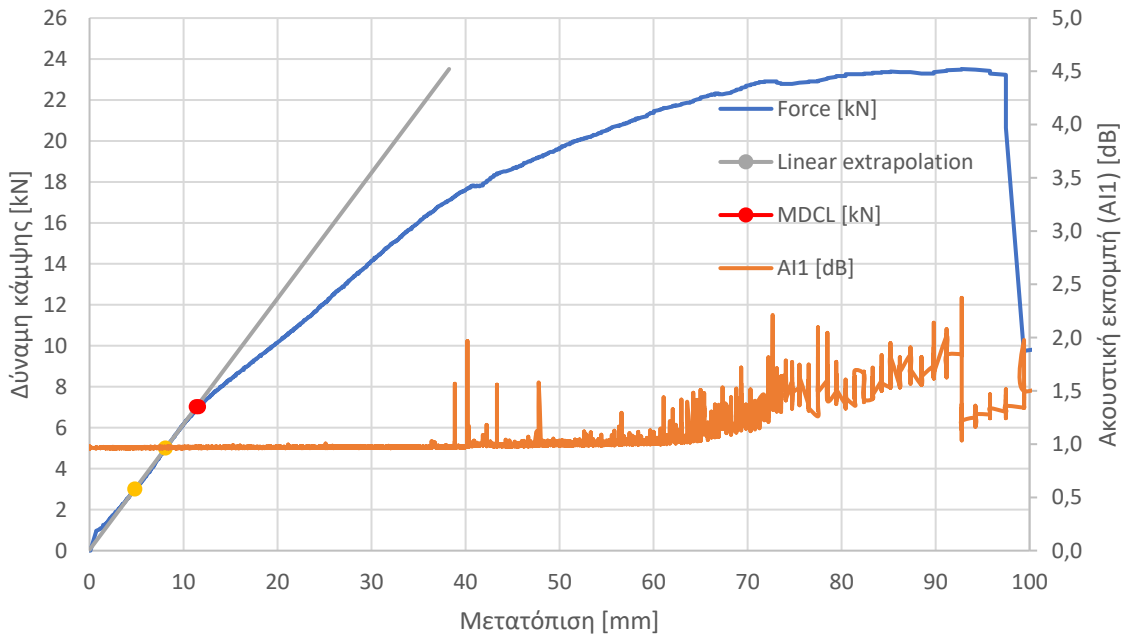


Σχήμα Ε - 35. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα D111 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.



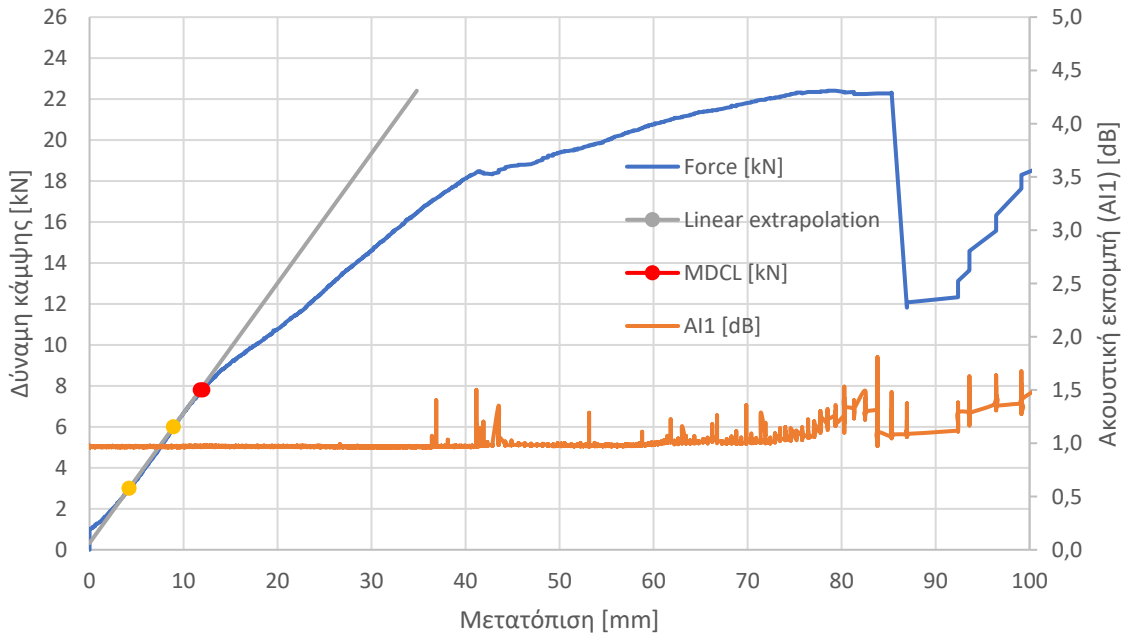
Σχήμα Ε - 36. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα D112 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.

D113

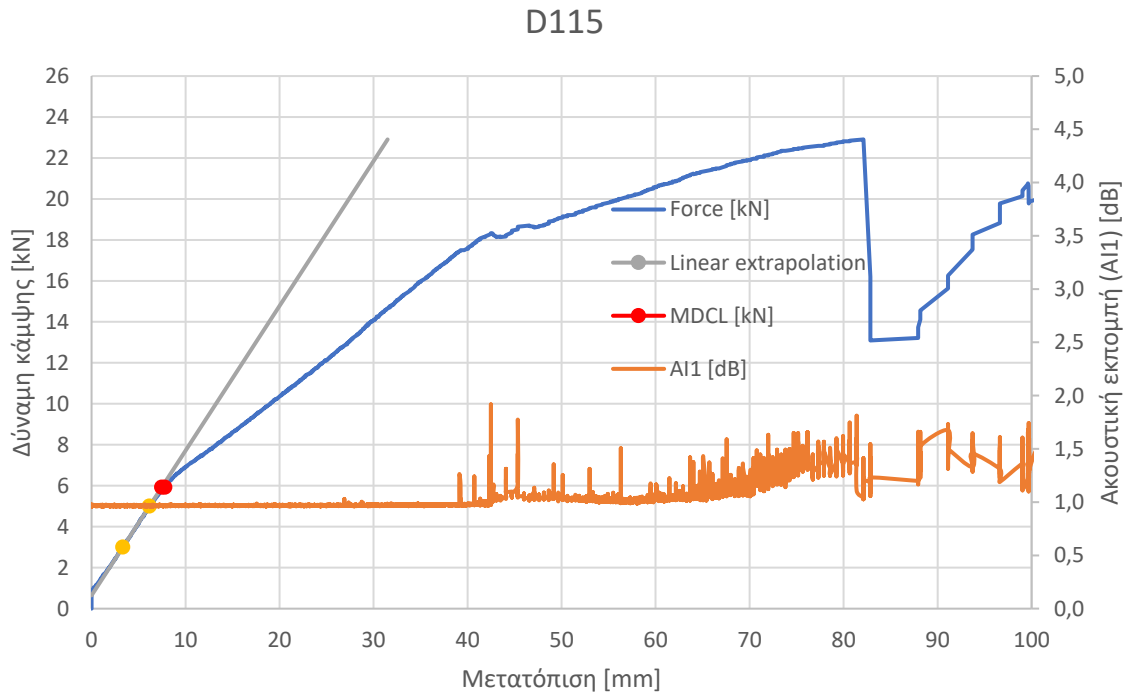


Σχήμα Ε - 37. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα D113 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.

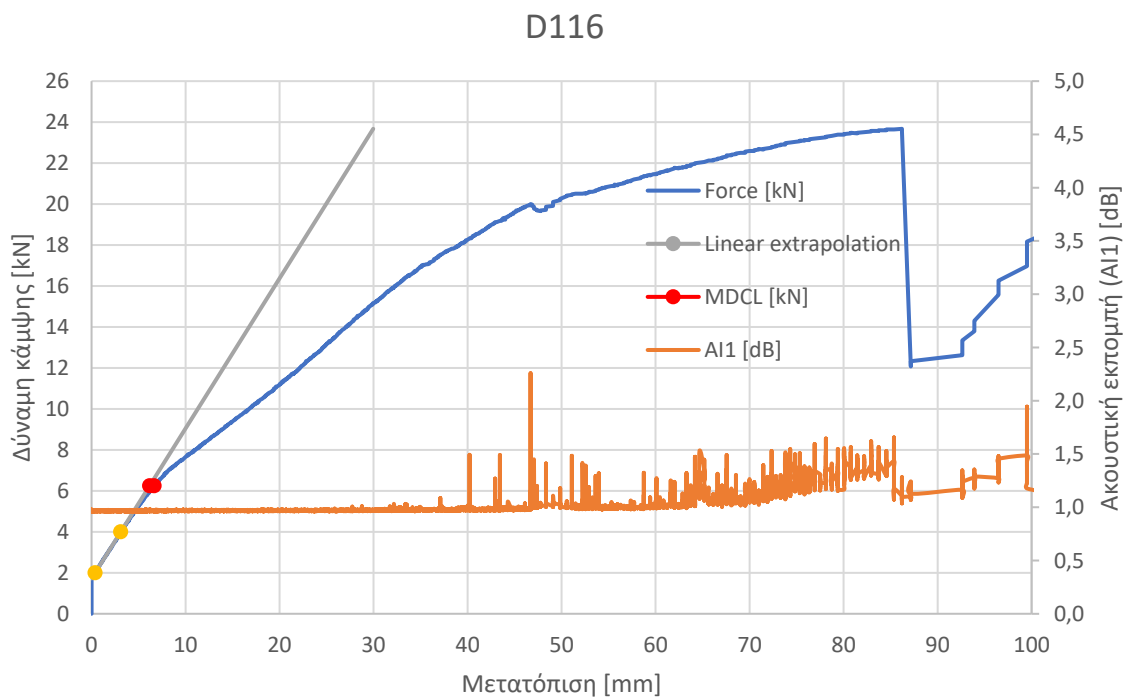
D114



Σχήμα Ε - 38. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα D114 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.

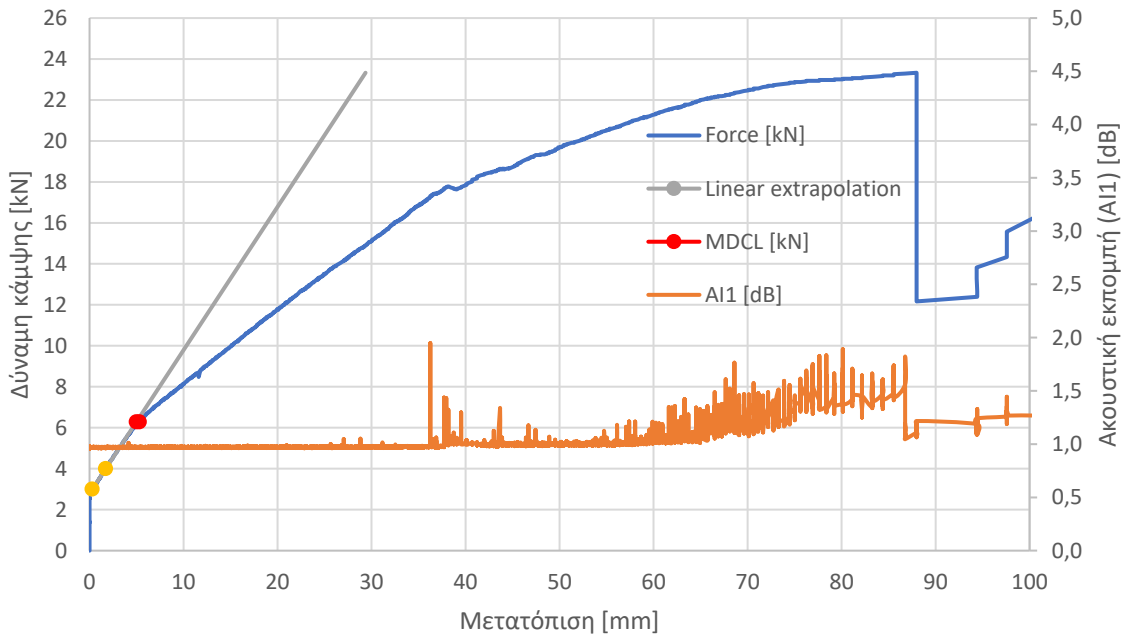


Σχήμα Ε - 39. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα D115 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.



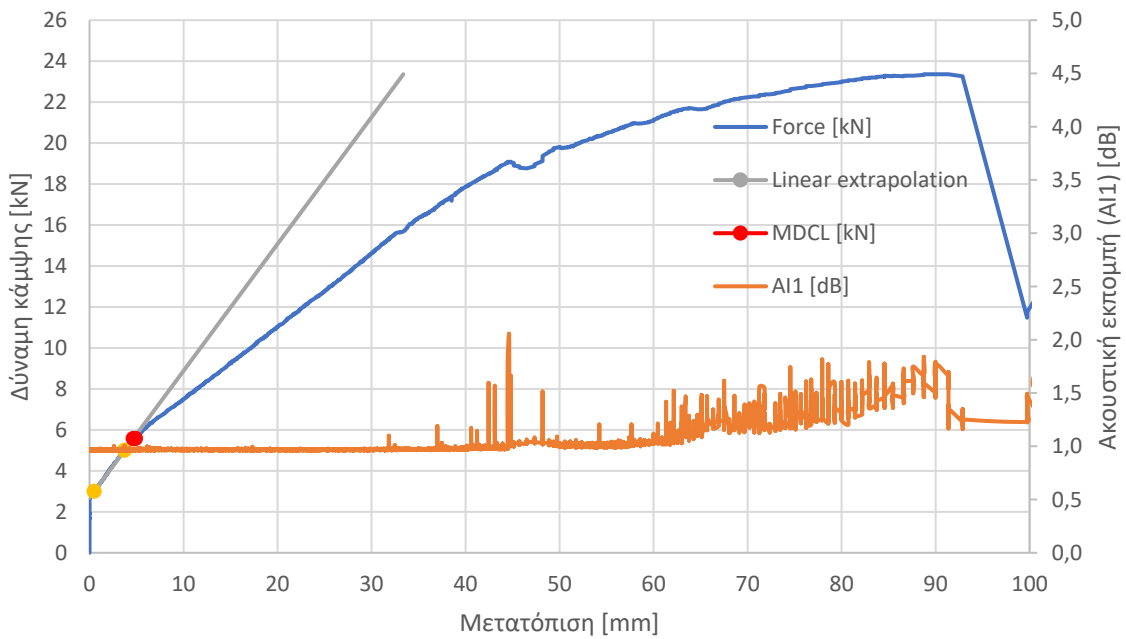
Σχήμα Ε - 40. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα D116 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.

D117



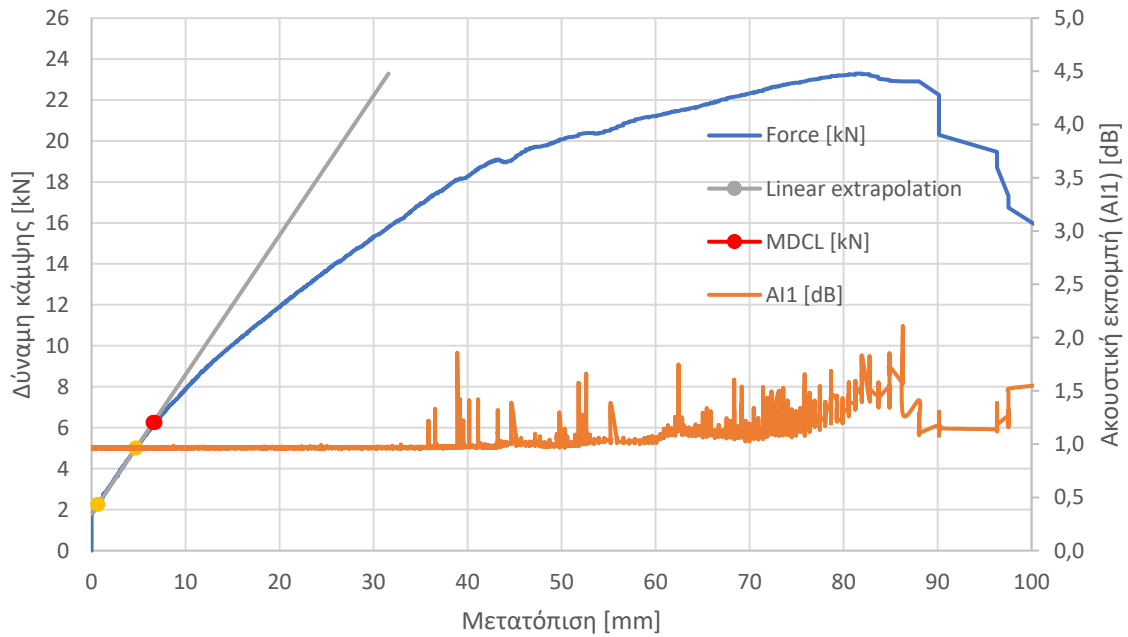
Σχήμα Ε - 41. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα D117 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.

D118



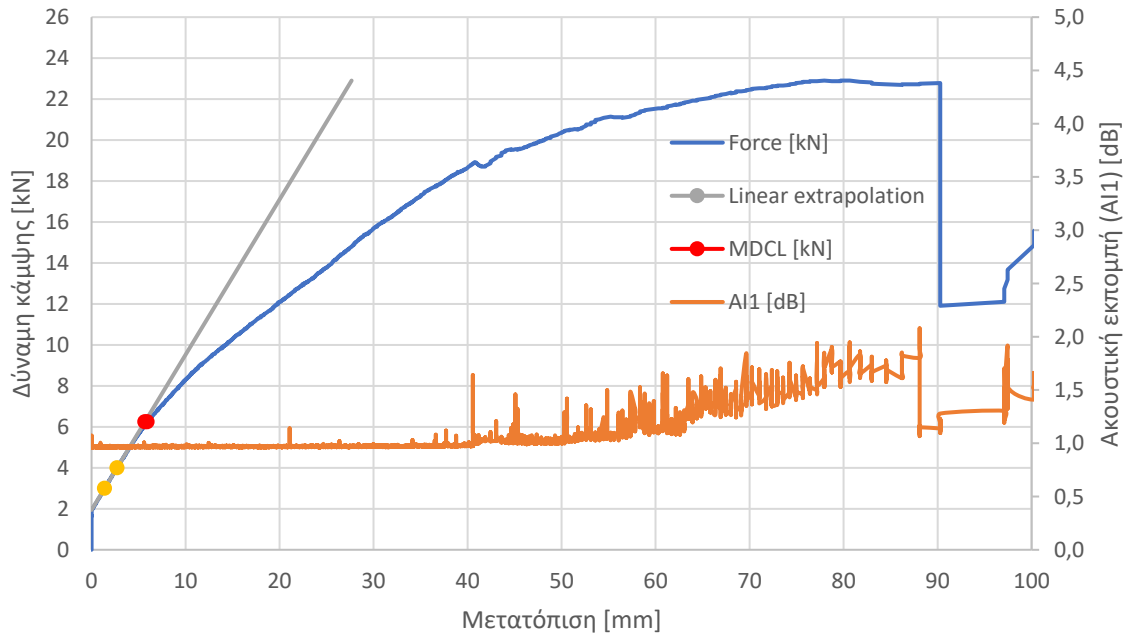
Σχήμα Ε - 42. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα D118 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.

D119



Σχήμα Ε - 43. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα D119 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.

D120



Σχήμα Ε - 44. Διάγραμμα ασκούμενης δύναμης κάμψης στον μονωτήρα D120 και ακουστικής εκπομπής στον κάτω μεταλλικό ακροδέκτη του συναρτήσεως της μετατόπισης του άκρου του μονωτήρα στο οποίο ασκούταν η δύναμη από την αρχική θέση ηρεμίας του.