ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Νικολάου Χ. Μαυρικάκη
Δρ. Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ 150 kV ΑΚΟΛΟΥΘΩΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΤΟΥΣ ΑΠΟ ΔΑΣΙΚΗ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Ηράκλειο 2025

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Νικολάου Χ. Μαυρικάκη

Δρ. Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ 150 kV ΑΚΟΛΟΥΘΩΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΤΟΥΣ ΑΠΟ ΔΑΣΙΚΗ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ενέργειας
Ημερομηνία δημόσιας υποστήριξης: …17./09./2025

Εξεταστική επιτροπή:
Αν. Καθηγητής Κυριάκος Σιδεράκης, Επιβλέπων
Επ. Καθηγητής Γεώργιος Ορφανουδάκης
Επ. Καθηγητής Αντώνιος Τσικαλάκης

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ 150 kV ΑΚΟΛΟΥΘΩΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΤΟΥΣ ΑΠΟ ΔΑΣΙΚΗ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Μεταπτυχιακή Διατριβή

© Νικόλαος Χ. Μαυρικάκης
©ΕΛΜΕΠΑ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ 150 kV ΑΚΟΛΟΥΘΩΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΤΟΥΣ ΑΠΟ ΔΑΣΙΚΗ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

ISBN

«Η έγκριση της παρούσης Μεταπτυχιακής Διατριβής από το τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνωμών του συγγραφέως» (Ν. 5343/1932, άρθρο 202, παρ. 2)

Πρόλογος

Το παρόν σύγγραμμα αποτελεί τη μεταπτυχιακή διατριβή μου με θέμα «Εργαστηριακή Διερεύνηση της Υποβάθμισης Συνθετικών Μονωτήρων 150kV ακολούθως της καταπόνησης τους από δασική πυρκαγιά», η οποία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου υπό την επίβλεψη του Αναπληρωτή Καθηγητή Κυριάκου Σιδεράκη.

Η μεταπτυχιακή διατριβή αποτελείται από πέντε κεφάλαια. Στο πρώτο εισαγωγικό κεφάλαιο περιγράφονται οι επιπτώσεις των δασικών πυρκαγιών στο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Περιγράφονται οι ζημιές που μπορεί να προκύψουν στον εξοπλισμό και επιπροσθέτως αναλύεται ο κίνδυνος ηλεκτροπληξίας στους ανθρώπους που επιχειρούν στην κατάσβεση της πυρκαγιάς.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στον υπολογισμό της απόστασης ασφαλείας από τις εναέριες γραμμές μεταφοράς σε συνθήκες πυρκαγιάς. Συγκεκριμένα προτείνεται μεθοδολογία υπολογισμού των αποστάσεων ασφαλείας από μια γραμμή μεταφοράς για την αποφυγή του ηλεκτρικού πλήγματος στο έδαφος λόγω της διάσπασης της μόνωσης του αέρα καθώς επίσης και για την προστασία των ανθρώπων που επιχειρούν στην κατάσβεση της πυρκαγιάς από το σημείο του πλήγματος προκειμένου να μην κινδυνεύσουν από ηλεκτροπληξία.

Στο τρίτο κεφάλαιο συνοψίζεται η εμπειρία από τις εταιρίες ηλεκτρισμού ανά τον κόσμο σχετικά με πυρκαγιές κάτω από εναέριες γραμμές μεταφοράς καθώς και τα μέτρα που έχουν λάβει για τον περιορισμό της επίδρασης της πυρκαγιάς στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αξιολογείται η κατάσταση συνθετικών μονωτήρων 150kV μετά την καταπόνηση τους από δασική πυρκαγιά μέσω ποικίλων διαγνωστικών τεχνικών που προτείνονται στις σχετικές οδηγίες της CIGRE και της IEC. Οι επιπτώσεις της πυρκαγιάς στην κατάσταση των μονωτήρων συζητούνται στη βάση μορφολογικών αλλοιώσεων, μεταβολών στη μοριακή δομή και μεταβολών της κατάστασης διαβροχής των συνθετικών μονωτήρων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα σημαντικότερα συμπεράσματα της διατριβής, παρουσιάζεται η συμβολή της στην ερευνητική περιοχή και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Στο σημείο αυτό θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Αν. Καθηγητή Κυριάκο Σιδεράκη για την εμπιστοσύνη του αναθέτοντας μου την μεταπτυχιακή διατριβή, καθώς και για την καθοδήγησή του και την αμέριστη συμπαράστασή του κατά την διάρκεια εκπόνησής της.

Ηράκλειο, Σεπτέμβριος 2025

Νικόλαος Χ. Μαυρικάκης

Περιεχόμενα

1. Σύστημα μεταφοράς και πυρκαγιές **1**

1.1 Επιπτώσεις δασικών πυρκαγιών στο σύστημα μεταφοράς 1

1.2 Ηλεκτρική διάσπαση της μόνωσης του αέρα στις εναέριες γραμμές λόγω πυρκαγιάς 6

1.3 Κίνδυνος ηλεκτροπληξίας λόγω της ηλεκτρικής διάσπασης του αέρα 8

1.4 Βιβλιογραφία 10

2. Υπολογισμός αποστάσεων ασφαλείας από τις εναέριες γραμμές μεταφοράς σε περίπτωση πυρκαγιάς **11**

2.1 Υπολογισμός απόστασης ηλεκτρικού πλήγματος από την γραμμή μεταφοράς 11

2.2 Υπολογισμός ελάχιστης απόστασης ασφαλείας από το σημείο του πλήγματος 13

2.3 Υπολογισμός ασφαλούς απόστασης της βλάστησης από γραμμές μεταφοράς για την αποφυγή ηλεκτρικού πλήγματος 17

2.4 Βιβλιογραφία 21

3. Εμπειρία από σφάλματα σε γραμμές μεταφοράς λόγω πυρκαγιάς και μέτρα αντιμετώπισης **22**

3.1 Η περίπτωση του Μεξικού 22

3.2 Η περίπτωση της Βραζιλίας 22

3.3 Η περίπτωση της Αυστραλίας 23

3.4 Η περίπτωση της Νοτίου Αφρικής 23

3.5 Μέτρα περιορισμού της επίδρασης των δασικών πυρκαγιών σε γραμμές μεταφοράς 24

3.5.1 Σχεδιασμός όδευσης νέων εναέριων γραμμών μεταφοράς 24

3.5.2 Διαχείριση βλάστησης 25

3.6 Βιβλιογραφία 28

4. Αξιολόγηση της κατάστασης 150 kV συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης μετά την καταπόνησή τους από δασική πυρκαγιά **29**

4.1 Εισαγωγή 29

4.2 Εργαστηριακή διερεύνηση 30

4.2.1 Συνθήκες λειτουργίας συνθετικών μονωτήρων 30

4.2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά συνθετικών μονωτήρων 33

4.2.3 Διαγνωστικές τεχνικές αξιολόγησης της κατάστασης των μονωτήρων 35

4.3 Αποτελέσματα 40

4.3.1 Οπτική επιθεώρηση 40

4.3.2 Διαβάθμιση διαβροχής 60

4.3.3 Ανάλυση φασματοσκοπίας υπερύθρου με αποσβένουσα ολική ανάκλαση 102

4.3.4 Ανάλυση οπτικής μικροσκοπίας 127

4.4 Σύνοψη – Συμπεράσματα 165

4.5 Βιβλιογραφία 166

5. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα **169**

5.1 Συμπεράσματα 169
5.1.1 Επιπτώσεις των δασικών πυρκαγιών στο σύστημα μεταφοράς 169
5.1.2 Ηλεκτρική διάσπαση της μόνωσης του αέρα σε συνθήκες πυρκαγιάς και κίνδυνος ηλεκτροπληξίας 170
5.1.3 Αποστάσεις ασφαλείας από τις εναέριες γραμμές μεταφοράς 171
5.1.4 Μέτρα περιορισμού των αρνητικών επιπτώσεων των πυρκαγιών στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας 172
5.1.5 Επιπτώσεις της πυρκαγιάς στα μονωτικά υλικά συνθετικών μονωτήρων 172
5.2 Συμβολή της διατριβής 173
5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα 175

1. Σύστημα μεταφοράς και πυρκαγιές

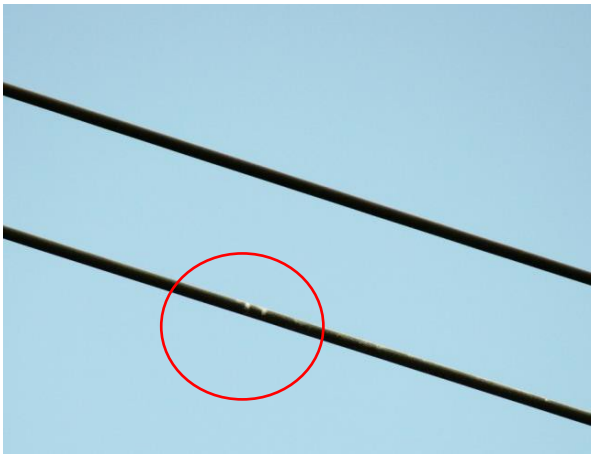
1.1 Επιπτώσεις δασικών πυρκαγιών στο σύστημα μεταφοράς

Οι δασικές πυρκαγιές έχουν καταστροφικές συνέπειες για τον άνθρωπο καθώς είναι συνυφασμένες με απώλεια ανθρώπινων ζωών, καταστροφή του φυσικού πλούτου καθώς και με απώλεια περιουσίας. Οι πυρκαγιές που εκδηλώνονται σε δασικές περιοχές συνήθως καταστρέφουν τεράστιες εκτάσεις δάσους λόγω του ισχυρού πυροθερμικού φορτίου και μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές ζημιές στα δίκτυα κοινής ωφελείας, συμπεριλαμβανομένου και του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Όσον αφορά τις υφιστάμενες εναέριες γραμμές μεταφοράς του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, το καθεστώς δουλείας γης στην ζώνη γης κάτω από το άνοιγμα της γραμμής επιτρέπει την τήρηση των ελάχιστων αποστάσεων ασφαλείας από τους ηλεκτροφόρους αγωγούς προκειμένου να μην προκληθεί διάσπαση της μόνωσης του αέρα προς γη. Ωστόσο, το καθεστώς αυτό δεν είναι αρκετό προκειμένου να εξασφαλιστεί η ακεραιότητα των εναέριων γραμμών στην περίπτωση εκδήλωσης πυρκαγιάς κάτω από αυτές, ιδιαίτερα στην περίπτωση που η όδευση τους είναι εντός δασικών περιοχών. Οι φλόγες, ο καπνός, η αυξημένη θερμοκρασία και τα προϊόντα καύσης λόγω της πυρκαγιάς υποβαθμίζουν την διηλεκτρική συμπεριφορά της γραμμής με αποτέλεσμα την πρόκληση ηλεκτρικού τόξου είτε μεταξύ των φάσεων είτε μεταξύ φάσεως και γης. Πλέον της υποβάθμισης της μόνωσης, υποβαθμίζεται και η μηχανική αντοχή του εξοπλισμού υποστήριξης με αποτέλεσμα τον κίνδυνο πτώσης των εναέριων γραμμών στην γη. Η ζημιά που προκαλείται στις εναέριες γραμμές μεταφοράς και γενικότερα στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας από δασικές πυρκαγιές είναι σημαντική και σχετίζεται με διακοπή ηλεκτροδότησης, καταστροφή του εξοπλισμού, προκαλώντας σημαντικό κόστος στον διαχειριστή του συστήματος.

Στον τεχνικό οδηγό 767 της Cigre [1] αναλύονται οι επιπτώσεις από τις πυρκαγιές στις εναέριες γραμμές μεταφοράς. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι επιπτώσεις της πυρκαγιάς στις εναέριες γραμμές μεταφοράς εξαρτώνται τόσο από τη διάρκεια της πυρκαγιάς όσο και από την έντασή της. Για το λόγο αυτό, γίνεται διάκριση μεταξύ πυρκαγιών χαμηλής έντασης που συνήθως αναφέρονται στην καύση χαμηλής βλάστησης όπως χόρτα και δασικών πυρκαγιών υψηλής έντασης, που σχετίζονται με πυρκαγιές σε περιοχές με υψηλή και πυκνή βλάστηση. Γενικά, οι πυρκαγιές που οφείλονται στην καύση χαμηλής βλάστησης είναι συνήθως μικρής έντασης και εξαρτώνται από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες και το πυροθερμικό φορτίο της καύσιμης ύλης, και συνήθως δεν προκαλούν σημαντικές ζημιές στις εναέριες γραμμές μεταφοράς. Αντιθέτως οι πυρκαγιές υψηλής έντασης, μπορούν να προκαλέσουν από υπερπήδηση των μονωτήρων λόγω διηλεκτρικής υποβάθμισης της διηλεκτρικής αντοχής τόσο του αέρα όσο και του μονωτήρα έως και πτώση αγωγού από λόγω της

μηχανικής υποβάθμισης του συστήματος στήριξης των εναέριων γραμμών εξαιτίας ισχυρής θερμικής καταπόνησης.

Προς το παρόν δεν υπάρχει κάποια πρότυπη διαδικασία σχετικά με την διενέργεια εργασιών στις εναέριες γραμμές μεταφοράς μετά από την καταπόνησή τους από δασικές πυρκαγιές, συνεπώς η διενέργεια επιθεώρησης πριν την ηλέκτριση των γραμμών επαφίεται αποκλειστικά και μόνο στην κρίση της επιχείρησης. Συνήθως σε περίπτωση δασικής πυρκαγιάς κάτω από εναέριες γραμμές μεταφοράς, ο διαχειριστής του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας διακόπτει την ηλεκτροδότηση (εφόσον είναι εφικτό) για την ασφαλή κατάσβεση της πυρκαγιάς και εν συνεχεία διενεργεί επιθεώρηση προκειμένου να διαπιστώσει την κατάσταση του εγκατεστημένου εξοπλισμού που καταπονήθηκε από την πυρκαγιά. Στα Σχήματα 1.1 έως και 1.9 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές ζημιές στο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας που προκαλούνται από την εκδήλωση πυρκαγιάς κάτω από τις εναέριες γραμμές.



Σχήμα 1.1: Φθορά εναέριου αγωγού από την ανάπτυξη ηλεκτρικού τόξου εξαιτίας της διηλεκτρικής διάσπασης του αέρα από την πυρκαγιά.



Σχήμα 1.2: Θραύση εναέριου αγωγού εξαιτίας της έντονης θερμικής καταπόνησης του από την πυρκαγιά.



Σχήμα 1.3: Καταστροφή του συστήματος αντιδιαβρωτικής προστασίας του μεταλλικού πύργου.



Σχήμα 1.4: Πτώση μεταλλικού πύργου εξαιτίας της θερμικής καταπόνησης του από την πυρκαγιά σε συνδυασμό με ισχυρούς ανέμους.



Σχήμα 1.5: Καταστροφές από πυρκαγιά σε ξύλινη δομή υποστήριξη εναέριων γραμμών.



Σχήμα 1.6: Καταστροφή μετασχηματιστή διανομής από πυρκαγιά



Σχήμα 1.7: Καταστροφή πλαστικού κυτίου συστήματος καθοδικής προστασίας του μεταλλικού πύργου από πυρκαγιά



Σχήμα 1.8: Γυάλινος μονωτήρας με ίχνη υπερπήδησης εξαιτίας της ρύπανσής του από προϊόντα καύσης.



Σχήμα 1.9: Φθορά σπειροειδή αποσβεστήρα κραδασμών από πυρκαγιά.

Πλέον των ορατών ζημιών που υφίσταται ο εξοπλισμός στις εναέριες γραμμές μεταφοράς από την πυρκαγιά, καταπονείται και ο εγκατεστημένος εξοπλισμός προστασίας στους υποσταθμούς όπου καταλήγουν οι γραμμές μεταφοράς. Για παράδειγμα, σε περίπτωση πυρκαγιάς κάτω από εναέριες γραμμές μεταφοράς προκαλούνται σφάλματα μόνωσης εξαιτίας της διάσπασης του αέρα με αποτέλεσμα να ενεργοποιείται η προστασία της εναέριας γραμμής, που βρίσκεται εγκατεστημένη στους υποσταθμούς. Τα σφάλματα αυτά καταπονούν τον εγκατεστημένο εξοπλισμό προστασίας των υποσταθμών και έχουν αρνητική επίδραση στην διάρκεια ζωής του εξοπλισμού.

Επιπροσθέτως λόγω ηλεκτρικού πλήγματος από την διάσπαση της μόνωσης του αέρα έχουν καταγραφεί τραυματισμοί ή/και θάνατος ανθρώπων από ηλεκτροπληξία λόγω της αναπτυσσόμενης βηματικής τάσης. Ακόμη έχει καταγραφεί θάνατος ανθρώπων από ηλεκτροπληξία κατά την προσπάθεια κατάσβεσης της πυρκαγιάς που προήλθε από την επαφή ενός δέντρου με εναέρια γραμμή μεταφοράς. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι οι δασικές πυρκαγιές χρήζουν ιδιαίτερης αντιμετώπισης από τους πυροσβέστες αλλά και γενικότερα στους ανθρώπους που επιχειρούν στην κατάσβεση προκειμένου να μην υπάρχουν τραυματισμοί ή θάνατος.

1.2 Ηλεκτρική διάσπαση της μόνωσης του αέρα στις εναέριες γραμμές λόγω πυρκαγιάς

Στην περίπτωση πυρκαγιάς κάτω από εναέριες γραμμές μεταφοράς έχει παρατηρηθεί η ανάπτυξη ηλεκτρικού τόξου σε στοιχεία εξοπλισμού που βρίσκονται σε διαφορετικό δυναμικό λόγω της διάσπασης της μόνωσης του αέρα. Επίσης έχουν καταγραφεί τραυματισμοί ή θάνατοι ανθρώπων από ηλεκτροπληξία κοντά στο σημείο πλήγματος του ηλεκτρικού τόξου. Για το λόγο αυτό αρκετοί ερευνητές προσπάθησαν να διερευνήσουν τις συνθήκες ηλεκτρικής διάσπασης του αέρα υπό συνθήκες πυρκαγιάς.

Οι Deno και Zaffanela [2], 1982, ισχυρίστηκαν ότι ο πυκνός καπνός, χωρίς φλόγα, δεν μπορεί να προκαλέσει ηλεκτρική διάσπαση του αέρα κάτω από μια γραμμή μεταφοράς. Αργότερα το 1990, ο Mousa [3] διατύπωσε ότι ο εκλυόμενος πυκνός καπνός από την πυρκαγιά μπορεί να συμβάλει στον σχηματισμό αγώγιμης όδευσης, μέσω της οποίας θα συμβεί η ηλεκτρική διάσπαση. Ως γνωστόν η τάση διάσπασης του αέρα εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Ωστόσο στην περίπτωση πυρκαγιάς ο μηχανισμός διάσπασης του αέρα περιπλέκεται καθώς διάφοροι παράγοντες λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα. Μέσω καταγραφής των συνθηκών σε περιπτώσεις πυρκαγιάς κάτω από εναέριες γραμμές μεταφοράς όπου παρατηρήθηκε διάσπαση του αέρα προκύπτει ότι οι πιο σημαντικές παράμετροι είναι η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και η ταχύτητα του ανέμου. Οι συνθήκες που ευνοείται η διάσπαση του αέρα λόγω πυρκαγιάς είναι:

- Θερμοκρασία περιβάλλοντος >23^{o}C
- Σχετική υγρασία <22%
- Ταχύτητα ανέμου >4m/s

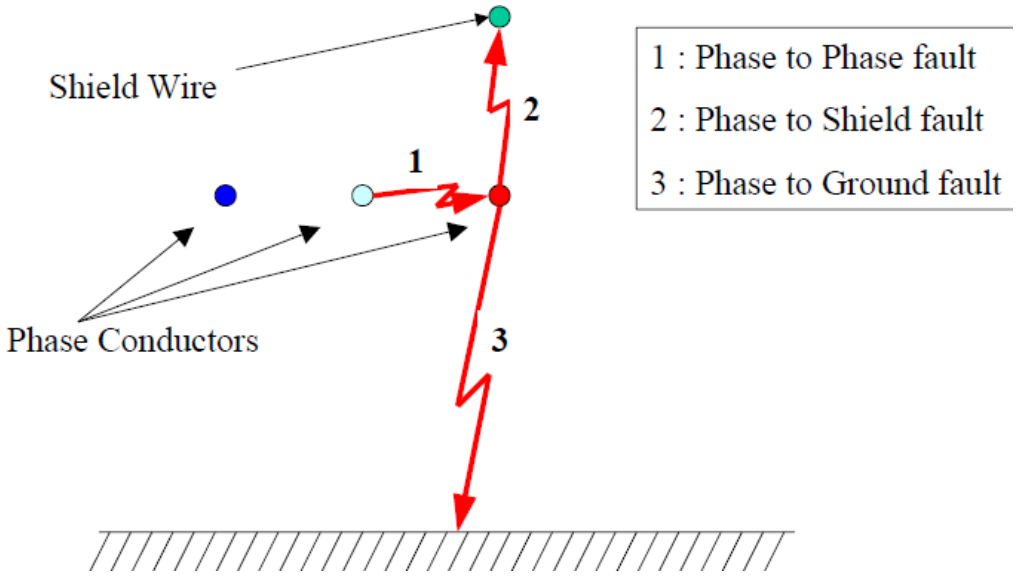
Καθοριστικής σημασίας για την διάσπαση του αέρα είναι η απόσταση των γειτονικών κατασκευών ή της βλάστησης από τους εναέριους αγωγούς μεταφοράς. Παρόλο που κατά την κατασκευή του συστήματος μεταφοράς τηρούνται οι απαραίτητες αποστάσεις ασφαλείας, παρατηρείται εκ των υστέρων το φαινόμενο της ανέγερσης κατασκευών εντός της ζώνης δουλείας από τους ιδιοκτήτες γης. Αντίστοιχα, στις εναέριες γραμμές μεταφοράς που διέρχονται από δασικές περιοχές η ανάπτυξη της δασικής βλάστησης έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της κρίσιμης απόστασης ασφαλείας.

Επίσης έχει παρατηρηθεί ότι το είδος βλάστησης που καίγεται σχετίζεται με την ηλεκτρική διάσπαση του αέρα. Τόσο η ένταση της πυρκαγιάς όσο και η πιθανότητα διάσπασης του αέρα σχετίζονται με την περιεκτικότητα της καύσιμης ύλης σε πτητικά έλαια.

Τέλος ο παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η όδευση ανάπτυξης του ηλεκτρικού τόξου σε συνθήκες πυρκαγιάς. Οι Bologna & Sadurski [4] μελετώντας την πιθανότητα διάσπασης του αέρα σε διάφορα επίπεδα τάσης των εναέριων

γραμμών μεταφοράς κατέληξαν στα εξής συμπεράσματα σχετικά με την όδευση του ηλεκτρικού τόξου:

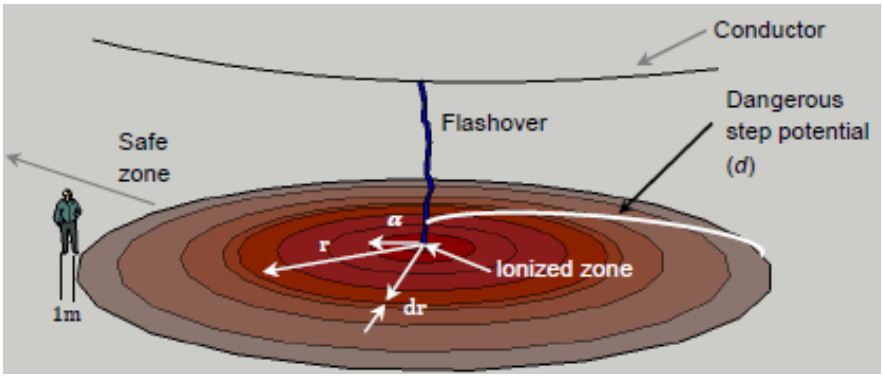
1. Στις εναέριες γραμμές μεταφοράς άνω των 400kV πρέπει τουλάχιστον το 50% της απόστασης ανάμεσα στους ηλεκτροφόρους αγωγούς και την καύσιμη ύλη να καλυφθεί με φλόγες προκειμένου να προκληθεί διάσπαση.
2. Η πιθανότητα διάσπασης του αέρα ως προς γη σε επίπεδο τάσης άνω των 132kV είναι μεγάλη όταν οι φλόγες είναι κοντά στους ηλεκτροφόρους αγωγούς. Η πιθανότητα αυξάνει όταν οι φλόγες είναι σε επαφή με τους ηλεκτροφόρους αγωγούς.
3. Σε επίπεδο τάσης μικρότερο από 220kV, είναι πιθανότερο να συμβεί σφάλμα μόνωσης του αέρα από φάση σε φάση ή από φάση ως προς τον αγωγό προστασίας σε σχέση με την ανάπτυξη σφάλματος από φάση ως προς γη.



Σχήμα 1.10: Πιθανά σφάλματα μόνωσης του αέρα σε εναέριες γραμμές μεταφοράς.

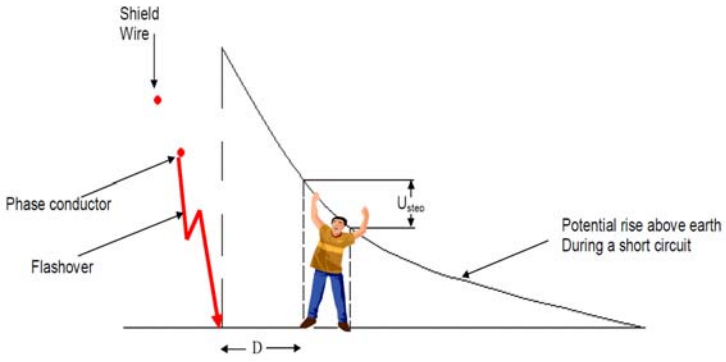
1.3 Κίνδυνος ηλεκτροπληξίας λόγω της ηλεκτρικής διάσπασης του αέρα

Κατά την ηλεκτρική διάσπαση του αέρα, λόγω σφάλματος φάσεως – γης, σε μια γραμμή μεταφοράς, το δυναμικό του εδάφους ανυψώνεται γύρω από το σημείο του ηλεκτρικού πλήγματος. Στο σημείο αυτό, το δυναμικό λαμβάνει την μέγιστη τιμή του και φθίνει με την απόσταση από αυτό.



Σχήμα 1.11: Ζώνη εδάφους με αυξημένο δυναμικό πλησίον του πλήγματος του ηλεκτρικού τόξου.

Η έκταση της ζώνης εδάφους με ανυψωμένο δυναμικό σχετίζεται με την αγωγιμότητα του εδάφους και το ρεύμα σφάλματος. Το τελευταίο εξαρτάται από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Στην περίπτωση που υπάρχουν άνθρωποι ή ζώα εντός της ζώνης ιονισμού του εδάφους κινδυνεύουν από ηλεκτροπληξία λόγω της διαφοράς δυναμικού που αναπτύσσεται στα πόδια τους κατά τον βηματισμό τους. Η τάση αυτή είναι γνωστή και ως βηματική τάση. Η επίδραση της βηματικής τάσης αναμένεται να είναι μεγαλύτερη στα ζώα σε σχέση με τον άνθρωπο καθώς η έκταση του βηματισμού τους είναι μεγαλύτερη.



Σχήμα 1.12: Ανάπτυξη βηματικής τάσης.

Στην περίπτωση που το σφάλμα μόνωσης αφορά την ηλεκτρική διάσπαση του αέρα λόγω σφάλματος φάσεως ως προς την μεταλλική δομή στήριξης (πύργος), εξαιτίας υπερπήδησης του μονωτήρα, το ρεύμα βραχυκυκλώσεως διέρχεται μέσω της

μεταλλικής δομής στη γη, με αποτέλεσμα την ανύψωση του δυναμικού στην βάση του πύργου. Συνήθως στην ύπαιθρο και ειδικότερα στις χορτολιβαδικές και αγροτικές περιοχές, οι άνθρωποι χρησιμοποιούν την βάση των μεταλλικών πύργων για τις αγροτικές δραστηριότητες τους, με αποτέλεσμα ο μεταλλικός πύργος να βρίσκεται σε επαφή με διάφορα αγώγιμα μεταλλικά αντικείμενα όπως για παράδειγμα φράκτες. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα αντικείμενα αυτά είναι ελλιπώς γειωμένα. Επομένως, στην περίπτωση που συμβεί ηλεκτρικό σφάλμα ως προς τον μεταλλικό πύργο, τα μεταλλικά αντικείμενα σε επαφή με τον πύργο, αποκτούν αυξημένο δυναμικό και μπορεί να προκαλέσουν ηλεκτροπληξία στην περίπτωση επαφής ανθρώπου ή ζώου. Το δυναμικό αυτό είναι γνωστό και ως δυναμικό επαφής.



Σχήμα 1.13: Μεταλλική περίφραξη σε επαφή με τους μεταλλικούς πύργους.

1.4 Βιβλιογραφία

[1] CIGRE WG B2.45, “Vegetation fire characteristics and the potential impacts on overhead line performance,” 2019.

[2] D. W. Deno and L. E. Zaffanella, “Flashovers caused by Fires,” in *Transmission Line Reference Book 345kV and above*, EPRI, 1982.

[3] A. M. Mousa, “Protecting Firemen against fire-Induced Flashovers.,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 5, no. 1, 1990.

[4] F. F. Bologna and K. J. Sadurski, “Assessment of Safety Risks Associated with Fire Induced Flashovers on High Voltage Transmission Lines,” 2001.

2. Υπολογισμός αποστάσεων ασφαλείας από τις εναέριες γραμμές μεταφοράς σε περίπτωση πυρκαγιάς

Κατά την εκδήλωση πυρκαγιάς κάτω από τις εναέριες γραμμές μεταφοράς μπορεί να προκληθεί ηλεκτρική διάσπαση της μόνωσης του αέρα με αποτέλεσμα τον τραυματισμό ή και θάνατο των ανθρώπων που επιχειρούν στην κατάσβεσή της. Για το λόγο αυτό, το 1990 ο Mousa [1] και το 2001 οι Bologna και Sadurski [2] προσπάθησαν να υπολογίσουν την ελάχιστη απόσταση ασφαλείας από τις εναέριες γραμμές σε περίπτωση πυρκαγιάς προκειμένου να αποφευχθεί τραυματισμός ή και θάνατος ανθρώπων από ηλεκτροπληξία. Για τον υπολογισμό της ελάχιστης απόστασης ασφαλείας λαμβάνονται υπόψη δύο παράμετροι:

1. Η οριζόντια απόσταση από την εξωτερική φάση έως το σημείο του εδάφους που θα καταλήξει το πλήγμα υπό συνθήκες ανέμου.
2. Την ελάχιστη απόσταση μεταξύ της θέσης του ανθρώπου και του σημείου του εδάφους που καταλήγει το πλήγμα.

2.1 Υπολογισμός απόστασης ηλεκτρικού πλήγματος από την γραμμή μεταφοράς

Στην περίπτωση πυρκαγιάς πλησίον εναέριας γραμμής μεταφοράς, η ηλεκτρική διάσπαση του αέρα ανάμεσα στην φάση και τη γη, αποτελεί το πιο επικίνδυνο σφάλμα που μπορεί να προκαλέσει ηλεκτροπληξία στους ανθρώπους λόγω βηματικής τάσης ή δυναμικού επαφής (Ενότητα 1.3). Σύμφωνα με τους Bologna και Sadurski [2], οι φλόγες και ο καπνός συμβάλουν στον σχηματισμό αγώγιμης όδευσης στον αέρα συνεπώς εννοούν την ανάπτυξη ηλεκτρικού τόξου. Κατά την ηλεκτρική διάσπαση του αέρα, το ηλεκτρικό τόξο οδεύει στο διάκενο του αέρα που γεφυρώνεται από τις φλόγες και τον καπνό. Η πιθανότητα σφάλματος φάσης - γη, στις εναέριες γραμμές μεταφοράς, είναι μεγαλύτερη για τα συστήματα που λειτουργούν σε επίπεδο τάση μεγαλύτερο από 132 kV.

Ο υπολογισμός της οριζόντιας απόστασης από τους εναέριους ηλεκτροφόρους αγωγούς σε σχέση με την γη όπου μπορεί να καταλήξει το ηλεκτρικό τόξο γίνεται σε συνθήκες ανέμου. Οι φλόγες και ο καπνός από την πυρκαγιά είναι πιθανόν να πλησιάσουν τους ηλεκτροφόρους αγωγούς παραπλεύρως της όδευσης της γραμμής όταν στην περιοχή της πυρκαγιάς πνέουν άνεμοι ισχυρής έντασης. Συνεπώς, η ελάχιστη οριζόντια απόσταση ανάμεσα στον ηλεκτροφόρο αγωγό και την γη υπολογίζεται από την σχέση:

$$d = \frac{U_{\max}}{E} \tag{1}$$

Όπου,

- U_{max}: η μέγιστη τιμή της τάσης του αγωγού προς τη γη (kV)
- E: η ελάχιστη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου όπου μπορεί να συμβεί διάσπαση του διακένου αέρα που γεφυρώνεται με φλόγα και καπνό (kV/m) και εξαρτάται από το είδος της καύσιμης ύλης.

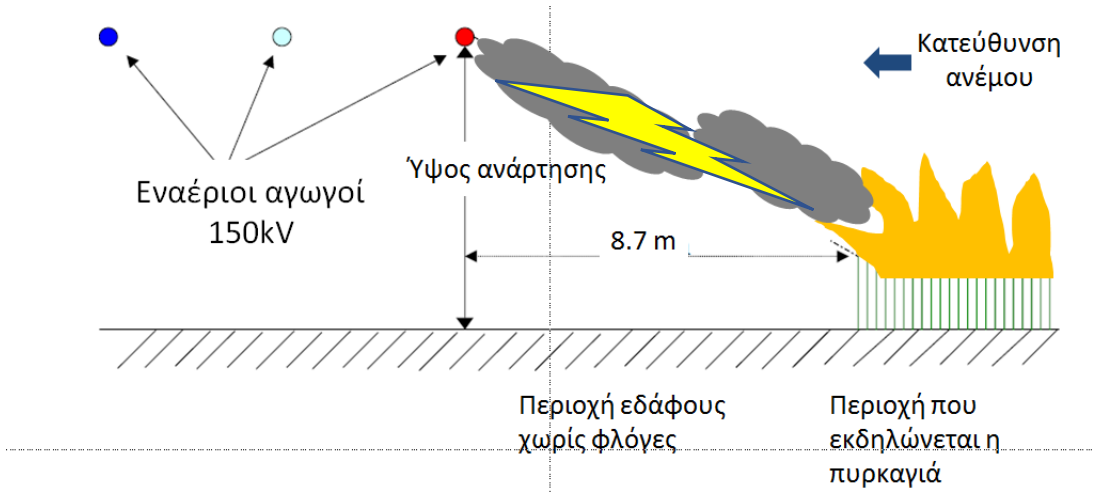
Σύμφωνα με τους Bologna και Sadurski [2] στην περίπτωση πυρκαγιάς σε ζαχαροκάλαμα προτείνουν ότι η ελάχιστη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που απαιτείται για τη διάσπαση του διακένου αέρα που γεφυρώνεται από καπνό και φλόγα λόγω καύσης ζαχαροτεύτλων είναι 11 kVrms/m.

Από την Σχέση (1) γίνεται αντιληπτό ότι η απόσταση που δύναται να καταλήξει το ηλεκτρικό πλήγμα είναι ανάλογη του επιπέδου τάσης της γραμμής.

Για παράδειγμα στην περίπτωση των εναέριων γραμμών μεταφοράς 150kV του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας και λαμβάνοντας υπόψη ότι μπορεί να υπάρξει διακύμανση τάσης προς τα άνω κατά 10%, τότε U_{max}= 150 x 1,10 =165kV. Θεωρώντας την ελάχιστη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που μπορεί να συμβεί διάσπαση του διακένου αέρα σε συνθήκες πυρκαγιάς είναι 11 kVrms/m [2], τότε η ελάχιστη οριζόντια απόσταση από τους αγωγούς μεταφοράς στο έδαφος υπολογίζεται:

$$d = \frac{U_{max}}{E} = \frac{165/\sqrt{3}}{11} = 8{,}7\text{m}$$

Στον παραπάνω υπολογισμό γίνεται η παραδοχή ότι η ένταση της πυρκαγιάς και η φορά του ανέμου είναι τέτοια που έχουν ως αποτέλεσμα την γεφύρωση του διακένου του αέρα από την φάση μέχρι και την βλάστηση με φλόγες. Οι φλόγες είναι σε επαφή με την φάση. Σε πραγματικές συνθήκες κατάσβεσης πυρκαγιάς πρέπει να συνεκτιμώνται η ένταση του ανέμου, το ύψος της φλόγας, οι περιβαλλοντικές συνθήκες, η απόσταση της φλόγας από τους αγωγούς καθώς και η παρουσία προϊόντων καύσης.



Σχήμα 2.1: Απόσταση μεταξύ φάσης και σημείου πλήγματος στην γη σε συνθήκες ανέμου.

2.2 Υπολογισμός ελάχιστης απόστασης ασφαλείας από το σημείο του πλήγματος

Όταν συμβεί ηλεκτρική διάσπαση του αέρα, στο σημείο της γης όπου καταλήγει το ηλεκτρικό τόξο ανυψώνεται το δυναμικό και προκύπτει κίνδυνος ηλεκτροπληξίας εξαιτίας της ανάπτυξης βηματικής τάσης για τους ανθρώπους που βρίσκονται κοντά στην περιοχή του ηλεκτρικού πλήγματος.

Η βηματική τάση υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V_s = \frac{I \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot (D+1)} \tag{2}$$

Όπου :

- I: η ένταση του ρεύματος σφάλματος
- D: η απόσταση από το σημείο του πλήγματος
- ρ: η ειδική αντίσταση του εδάφους

Αναλόγως της σύστασης του εδάφους μπορούν να θεωρηθούν οι ακόλουθες τιμές ειδικής αντίστασης.

Πίνακας 2.1: Τυπικές τιμές ειδικής αντίστασης του εδάφους.

Ποιότητα Εδάφους- Περιοχή	**ρ (Ω m)**
Αγροτική	200
Ημι-ερημική	500
Βραχώδης	1000

Η αποδεκτή τιμή της βηματικής τάσης για τον άνθρωπο σχετίζεται με τα αποδεκτά όρια του ρεύματος που μπορεί να διέλθει μέσω του σώματος και δίδεται από το πρότυπο IEEE80-1976 [3].

$$V = \frac{116 + 0.7\rho_s}{\sqrt{t}} \tag{3}$$

- t: η διάρκεια του ρεύματος σφάλματος σε s
- ρ_s: η ειδική αντίσταση του άνω στρώματος του εδάφους σε Ω m
- V: η αποδεκτή τιμή της βηματικής τάσης σε V

Για διάρκεια ρεύματος σφάλματος 0,5s και τιμή ειδικής αντίστασης εδάφους 100 Ω m προκύπτει από την Σχέση (3) ότι η αποδεκτή τιμή βηματικής τάσης είναι V=263V.

Για να υποστεί ο άνθρωπος ηλεκτροπληξία λόγω βηματικής τάσης πρέπει να υπερβαίνει την αποδεκτή τιμή της ασφαλούς βηματικής τάσης, όπως υπολογίζεται

από το πρότυπο IEEE80-1976. Επομένως για την εύρεση της ελάχιστης ασφαλούς απόστασης πρέπει $V_s = V$ δηλαδή:

$$\frac{I \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot (D+1)} = 263 \tag{4}$$

Επομένως η ελάχιστη ασφαλής απόσταση υπολογίζεται:

$$D = 0.5 \cdot \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot I \cdot \rho}{263 \cdot \pi}} \right] \tag{5}$$

Η επίλυση της Εξίσωσης 5 προϋποθέτει τον υπολογισμό του ρεύματος σφάλματος (I) που εξαρτάται από τον σχεδιασμό του συστήματος.

Το ρεύμα σφάλματος υπολογίζεται από την επίλυση της εξίσωσης:

$$\mathrm{I} = 0.5 \cdot \beta \cdot \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot \mathrm{I}_0}{\beta} \right)^2} \right] \tag{6}$$

Όπου:

$$\beta = \left(\frac{\mathrm{I}_0}{\mathrm{E}_p} \right)^2 \cdot \frac{3 \cdot \rho \cdot G}{2 \cdot \pi}$$

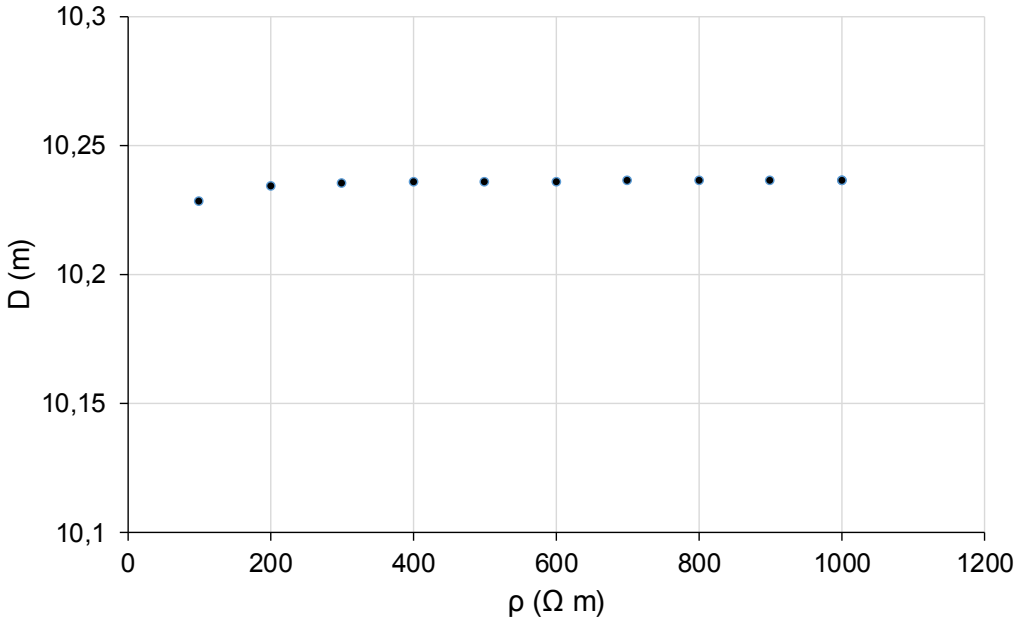
- I_o: το επίπεδο του ρεύματος σφάλματος του συστήματος σε A, ενδεικτικές τιμές 20kA, 30kA, 40kA και 50kA
- E_p: η μέγιστη τάση λειτουργίας της γραμμής (πολική τιμή) σε V
- ρ: η ειδική αντίσταση του εδάφους σε Ω m
- G: το πεδίο διάσπασης του εδάφους σε V/m, ενδεικτική τιμή 3kV/cm

Από την Σχέση 5 (υπολογισμός της ελάχιστης απόστασης ασφαλείας από το σημείο του ηλεκτρικού πλήγματος) προκύπτει ότι η σημαντικότερη παράμετρος που επιδρά είναι το ρεύμα σφάλματος το οποίο αυξάνει με την αύξηση του επιπέδου τάσης λειτουργίας της γραμμής.

Εφαρμόζοντας τις παραπάνω εξισώσεις για το σύστημα μεταφοράς 150 kV με τις ακόλουθες παραδοχές:

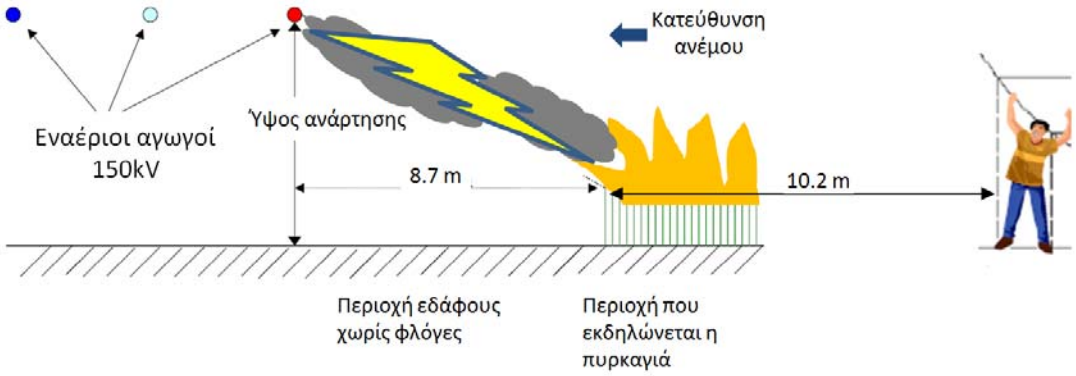
- Μέγιστη τάση συστήματος:165kV
- Επίπεδο του ρεύματος σφάλματος του συστήματος: 50kA
- Πεδίο διάσπασης του εδάφους 3kV/cm
- t: η διάρκεια του ρεύματος σφάλματος 0,5 s
- ρ_s: η ειδική αντίσταση του άνω στρώματος του εδάφους σε Ω m, 100 Ω m

Από την επίλυση της Σχέσης (5) προκύπτει ότι η ελάχιστη απόσταση ασφαλείας από το σημείο του πλήγματος είναι 10,2m για ειδική αντίσταση εδάφους με τιμές από 100 έως 1000 Ω m (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2: Ασφαλής απόσταση από το σημείο του πλήγματος στο έδαφος στο σύστημα των 150kV συναρτήσει της ειδικής αντίστασης εδάφους.

Στην περίπτωση των εναέριων γραμμών μεταφοράς του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς 150kV,ότι η ελάχιστη απόσταση από το ηλεκτροφόρο αγωγό ως προς τη γη είναι 8,7m και η ελάχιστη απόσταση ασφαλείας στο έδαφος από το σημείο του ηλεκτρικού πλήγματος είναι 10,2m για προστασία από βηματική τάση.



Σχήμα 2.3: Ελάχιστη απόσταση ασφαλείας εξαιτίας βηματικής τάσης.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις εργασίες των Bologna και Sadurski [2] και του Mousa [1] σχετικά με την επιχείρηση κατάσβεσης της πυρκαγιάς κάτω από τις εναέριες γραμμές μεταφοράς είναι τα εξής:

Σύμφωνα με τους Bologna και Sadurski [2], είναι ασφαλής η κατάσβεση της πυρκαγιάς κοντά σε εναέριες γραμμές, χωρίς αυτές να απενεργοποιηθούν όταν:

- Το επίπεδο τάσης του συστήματος μεταφοράς λειτουργεί σε επίπεδο τάσης μικρότερο από 66kV, υπό την προϋπόθεση ότι τηρείται μια ελάχιστη

απόσταση τουλάχιστον 10m από τον μεταλλικό πύργο.

- Τηρούνται οι ελάχιστες αποστάσεις ασφαλείας στο έδαφος για προστασία από βηματική τάση, στην περίπτωση που οι φλόγες γεφυρώνουν το διάκενο εναέριου αγωγού με το έδαφος, .
- Οι πυροσβέστες δεν έρθουν σε επαφή με μεταλλικά αντικείμενα, π.χ. φράκτες που είναι σε άμεση επαφή με τους μεταλλικούς πύργους.

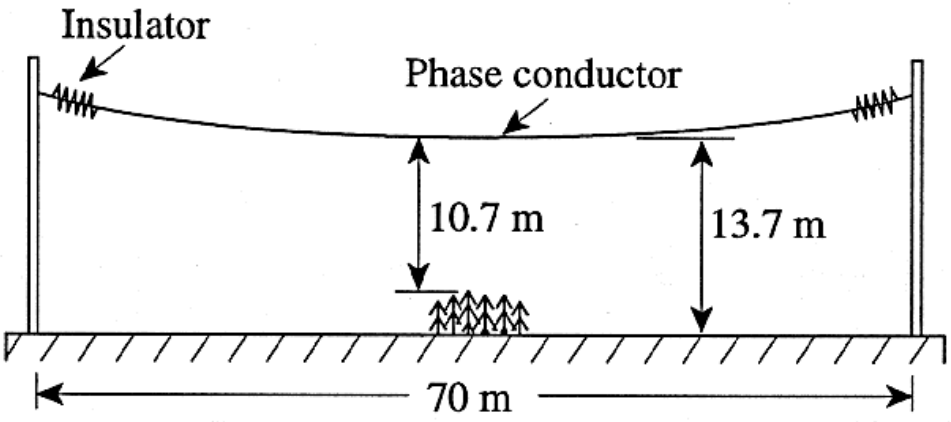
Σε κάθε περίπτωση οι πυροσβέστες θα πρέπει να φορούν υποδήματα με υψηλή αντίσταση προκειμένου να προστατευτούν από την ανάπτυξη βηματικής τάσης.

Τα συμπεράσματα από την εργασία του Mousa [1] είναι τα εξής:

- Είναι ασφαλής η κατάσβεση πυρκαγιάς εντός ή πλησίον της ζώνης δουλείας της εναέριας γραμμής υπό τάση όταν:
  - Η φωτιά δεν βρίσκεται εντός της ζώνης δουλείας της εναέριας γραμμής
  - Η απόσταση της φλόγας από τους εναέριους αγωγούς είναι μεγαλύτερη από 2m.
- Εάν εντοπιστεί μεγάλη πυρκαγιά εντός της ζώνης δουλείας, ο διαχειριστής του συστήματος πρέπει να απενεργοποιήσει την γραμμή. Εάν οι πυροσβέστες επιχειρήσουν υπό τάση πρέπει να τηρήσουν την ελάχιστη απόσταση ασφαλείας από αυτές προκειμένου να μην κινδυνεύσουν από βηματική τάση.
- Στην περίπτωση που η φωτιά διατρέχει σε γραμμή που υποστηρίζεται από ξύλινους στύλους τότε το κάτω μέρος των ξύλινων στύλων πρέπει να διαβρεχτεί με νερό προκειμένου να αποτραπεί η ανάφλεξη του ξύλινου στύλου.
- Η ζώνη εδάφους σε απόσταση 10 m από τους πύργους πρέπει να αποφεύγεται από τους πυροσβέστες καθώς υπάρχει κίνδυνος άμεσου ηλεκτρικού πλήγματος που μπορεί να προκύψει είτε λόγω της φωτιάς είτε από την διαβροχή της φωτιάς που είναι κοντά στην γραμμή με νερό.
- Οι πυροσβέστες πρέπει να αποφεύγουν να έρχονται σε επαφή με μεταλλικούς φράκτες ή μεταλλικές βάνες του συστήματος υδροδότησης που μπορεί να υπάρχουν ενός ή πλησίον της ζώνης δουλείας της γραμμής.

2.3 Υπολογισμός ασφαλούς απόστασης της βλάστησης από γραμμές μεταφοράς για την αποφυγή ηλεκτρικού πλήγματος

Οι Lanoie και Mercure [4] διερεύνησαν τις κρίσιμες συνθήκες που ευνοούν την ηλεκτρική διάσπαση του αέρα σε συνθήκες πυρκαγιάς κάτω από τις εναέριες γραμμές μεταφοράς. Για το λόγο αυτό, διεξήγαγαν δοκιμές σε μια πειραματική διάταξη εναέριας γραμμής μεταφοράς AC, όπου κάτω από την γραμμή υπήρχε βλάστηση (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4: Πειραματική διάταξη των Lanoie και Mercure.

Η πειραματική διάταξη που ανέπτυξαν περιελάμβανε μια γραμμή μεταφοράς AC που προσομοιώνει τα πραγματικά χαρακτηριστικά γραμμών AC των 735kV. Η ελάχιστή απόσταση της φάσης από το έδαφος είναι 13.7m και το μήκος της γραμμής είναι 70m. Ο αγωγός της εναέριας γραμμή ήταν κατασκευασμένος από αλουμίνιο, διαμέτρου 4.4cm. Κάτω από τον εναέριο αγωγό υπήρχαν δέντρα ύψους περίπου 3m, μειώνοντας την απόσταση ασφαλείας στα 10.7m. Η ηλέκτριση της γραμμής έγινε μέσω μετασχηματιστή τάσεως 1MVA που προστατευόταν από αντίσταση 15kΩ. Η μέγιστη τάση λειτουργίας της γραμμής ήταν 425kV rms. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων μετρήθηκε η εφαρμοζόμενη τάση της γραμμής, το ρεύμα της γραμμής και βιντεοσκοπήθηκαν ηλεκτρικές και φυσικές παράμετροι.

Σε συνθήκες πυρκαγιάς κάτω από τις εναέριες γραμμές μεταφοράς αναπτύσσονται ηλεκτρικές εκκενώσεων που μπορεί να οδηγήσουν σε σφάλμα γραμμής. Το κρίσιμο μέσο πεδίο έναυσης ηλεκτρικών εκκενώσεων σε συνθήκες πυρκαγιάς υπολογίστηκε στα 12kV /m.

Επομένως η κρίσιμη τάση διάσπασης του διακένου αέρα μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

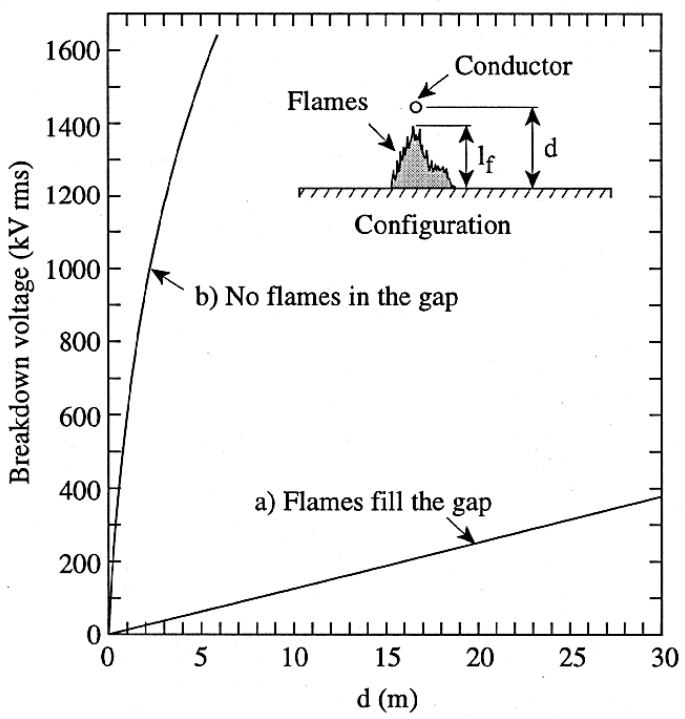
$$V_c = E_C \cdot l_f \tag{7}$$

όπου

- E_C : Το ελάχιστο κρίσιμο μέσο ηλεκτρικό πεδίο (kV rms/m)
- l_f : Το ύψος της φλόγας (m)

Εάν θεωρηθεί ότι οι φλόγες γεφυρώνουν το διάκενο του αέρα μεταξύ του εναέριου αγωγού και εδάφους, μπορεί να υπολογιστεί η κρίσιμη τάση διάσπασης.

Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται η κρίσιμη τάση διάσπασης του αέρα μιας εναέριας γραμμής μεταφοράς συναρτήσει της απόστασης της από το έδαφος στην περίπτωση που κάτω από την γραμμή (a) υπάρχουν φλόγες και στην περίπτωση (b) που δεν υπάρχουν φλόγες.



Σχήμα 2.5: Τάση διάσπασης στο διάκενο αέρα που σχηματίζεται από τον εναέριο αγωγό και το έδαφος στην περίπτωση α) που το διάκενο γεφυρώνεται με φλόγα και β) δεν υπάρχουν φλόγες.

Από την Εξίσωση (7) υπολογίζεται η ελάχιστη ασφαλής απόσταση του εναέριου αγωγού από το έδαφος συναρτήσει την τάσης του αγωγού στην περίπτωση που το διάκενο αέρα έχει γεφυρωθεί με φλόγες.

$$D = \frac{V}{E_c} = V/12 \tag{8}$$

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να εφαρμοστεί για τον υπολογισμό της ελάχιστης απόστασης ασφαλείας της κορυφής των δέντρων από τους εναέριους αγωγούς μεταφοράς.

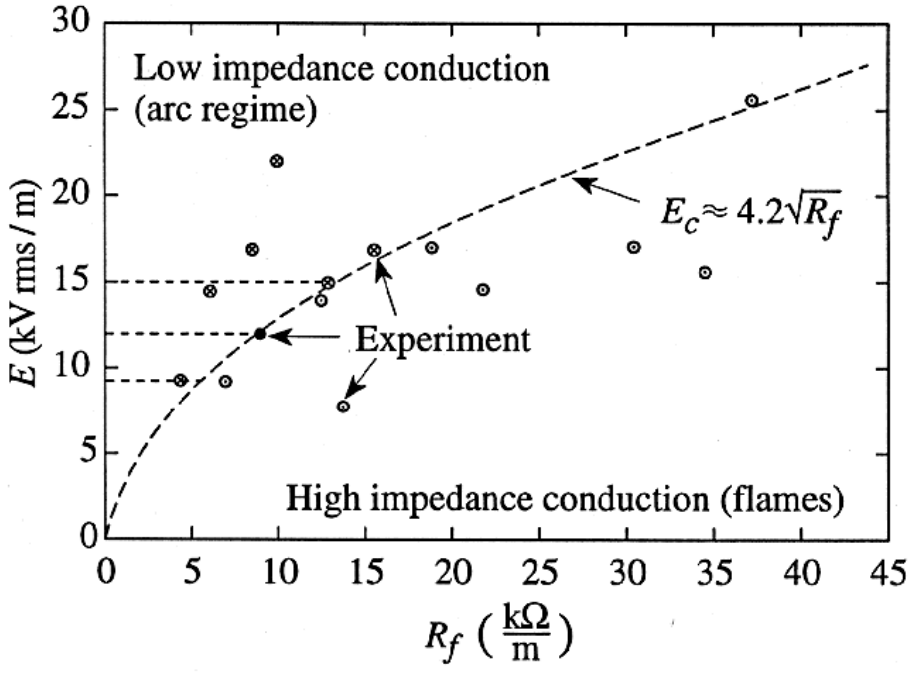
Μέσω καταγραφής του ρεύματος του μετασχηματιστή και της εφαρμοζόμενης τάσης υπολογίστηκε ότι η ειδική αντίσταση της φλόγας εκτιμάται από 5 kΩ/m έως 35 kΩ/m.

Βάσει της καταγραφής του ρεύματος του μετασχηματιστή διακρίνονται 2 φάσεις ηλεκτρικής δραστηριότητας. Η πρώτη φάση σχετίζεται με μικρές τιμές ρεύματος δηλαδή με χαμηλή ηλεκτρική δραστηριότητα, επομένως η ειδική αντίσταση της φλόγας έχει υψηλή τιμή (Σχήμα 2.6). Η δεύτερη φάση σχετίζεται με την ηλεκτρική διάσπαση του διακένου αέρα, όπου παρατηρούνται υψηλές τιμές ρεύματος και μικρή τιμή ειδικής αντίστασης φλόγας (Σχήμα 2.6). Με βάση τα αποτελέσματα διαπιστώθηκε ότι το κρίσιμο κατώφλι του ηλεκτρικού πεδίου για μετάβαση από την περιοχή της χαμηλής ειδικής αγωγιμότητας της φλόγας στην περιοχή υψηλής ειδικής αγωγιμότητας είναι:

$$E_c\,(kVrms/m) \approx 4.16 \cdot \sqrt{R_f} \tag{9}$$

Όπου

- E_C : Το ελάχιστο μέσο ηλεκτρικό πεδίο της φλόγας που παρατηρείται αύξηση του ρεύματος
- R_f : Η μέση ειδική αντίσταση (kΩ/m) της φλόγας πριν από την μετάβαση στην περιοχή του ηλεκτρικού τόξου.



Σχήμα 2.6: Κρίσιμο πεδίο μετάβασης στην περιοχή υψηλής αγωγιμότητας.

Συμπερασματικά, οι δοκιμές έδειξαν ότι οι διηλεκτρικές ιδιότητες του αέρα που περιβάλει τους εναέριους αγωγούς μεταφοράς μπορεί να υποβαθμιστούν στην

περίπτωση εκδήλωσης πυρκαγιάς πλησίον ή κάτω από αυτούς. Είναι σημαντικό να τηρούνται οι ελάχιστες αποστάσεις ασφαλείας της δασικής βλάστησης από τις εναέριες γραμμές μεταφοράς προκειμένου να αποφευχθούν σφάλματα γραμμών στην περίπτωση εκδήλωσης δασικής πυρκαγιάς. Η ελάχιστη προτεινόμενη ασφαλής απόσταση D της εναέριας γραμμής μεταφοράς από την βλάστηση υπολογίστηκε ως:

$$D = \frac{V}{E_c} = V/12 \text{ (m)} \tag{10}$$

Όπου:

- V η εφαρμοζόμενη φασική τάση της γραμμής μεταφοράς σε kV.

Βιβλιογραφία

[1] A. M. Mousa, “Protecting Firemen against fire-Induced Flashovers.,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 5, no. 1, 1990.
[2] F. F. Bologna and K. J. Sadurski, “Assessment of Safety Risks Associated with Fire Induced Flashovers on High Voltage Transmission Lines,” 2001.
[3] IEEE Std 80-1976, “IEEE Guide for Safety in Substation Grounding,” 1976.
[4] R. Lanoie and H. P. Mercure, “Influence of Forest fires on Power Line Insulation: AC Line Case,” in *10th International Symposium on High Voltage Engineering*.

3. Εμπειρία από σφάλματα σε γραμμές μεταφοράς λόγω πυρκαγιάς και μέτρα αντιμετώπισης

Στον τεχνικό οδηγό 767 [1] της Cigre καταγράφεται η εμπειρία από τις εταιρίες ηλεκτρικής ενέργειας σχετικά με τα αίτια των πυρκαγιών κάτω από τις γραμμές μεταφοράς καθώς και τις πρακτικές που έχουν εφαρμόσει προκειμένου να περιορίσουν την επίδραση των πυρκαγιών στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

3.1 Η περίπτωση του Μεξικού

Στο Μεξικό τα σφάλματα σε εναέριες γραμμές λόγω πυρκαγιάς προκύπτουν κυρίως σε αγροτικές περιοχές με καλλιέργειες ζαχαρότευτλων. Η αιτία του προβλήματος οφείλεται στον τρόπο συγκομιδής της καλλιέργειας από τους αγρότες καθώς εφαρμόζεται καύση των φυλλωμάτων της φυτείας χωρίς την καύση του βλαστού, προκειμένου να διευκολυνθεί η συγκομιδή με το χέρι αλλά και να αυξηθεί η περιεκτικότητα του ζαχαρακάλαμου σε σακχαρόζη. Η εταιρία ηλεκτρισμού προκειμένου να αντιμετωπίσει το πρόβλημα αυτό διεξήγαγε πειράματα υπό συνθήκες καύσης των ζαχαροκάλαμων προκειμένου να διερευνήσει την διηλεκτρική αντοχή του διακένου αέρα μεταξύ των εναέριων γραμμών και του εδάφους. Μέτρησαν ότι σε συνθήκες πυρκαγιάς η μέση διηλεκτρική αντοχή του διακένου ήταν 30kV/m. Εν συνεχεία προχώρησαν σε ανύψωση των εναέριων των αγωγών από το έδαφος προκειμένου να εξασφαλιστεί το ελάχιστο πεδίο διάσπασης του αέρα σε συνθήκες πυρκαγιάς. Για να επιτευχθεί η ανύψωση των εναέριων αγωγών χρησιμοποιήθηκαν ενδιάμεσοι πύργοι, αντικαταστάθηκαν υφιστάμενοι με υψηλότερους πύργους, καθώς επίσης ανύψωσαν υφιστάμενους πύργους με την προσθήκη προεκτάσεων. Ωστόσο η πρακτική αυτή είχε περιορισμένη αποτελεσματικότητα.

3.2 Η περίπτωση της Βραζιλίας

Όπως στην περίπτωση του Μεξικού και στην Βραζιλία, η βασική αιτία των σφαλμάτων σε εναέριες γραμμές λόγω πυρκαγιάς είναι η καύση των φυλλωμάτων στις φυτείες ζαχαροτεύτλων. Την δεκαετία του 90, τα σφάλματα που καταγράφηκαν στις γραμμές μεταφοράς εξαιτίας των πυρκαγιών κυμαινόταν από 10 έως 40 σφάλματα ανά έτος. Τα μισά περίπου από αυτά τα σφάλματα οφειλόταν σε καύση της καλλιέργειας των ζαχαροκάλαμων. Αποκορύφωμα αποτέλεσε το έτος 1994, όταν καταγράφηκαν 110 σφάλματα σε εναέριες γραμμές λόγω πυρκαγιών. Το συγκεκριμένο έτος καταγράφηκαν ιδιαίτερα ξηρές συνθήκες και επιπροσθέτως καθυστέρησαν οι εργασίες υλοτόμησης και αποψίλωσης της επικίνδυνης για πυρκαγιά βλάστησης. Στην περίπτωση καύσης των ζαχαροκάλαμων κάτω από τις

γραμμές μεταφοράς, μειώνεται σημαντικά η απόσταση ασφαλείας. Τα ζαχαροκάλαμα έχουν ύψος που κυμαίνεται από 4m έως 5m και όταν καίγονται το ύψος της φλόγας έχει ύψος μεγαλύτερο από 12m. Η καύση των ζαχαροκάλαμων έως και την δεκαετία του 90 ήταν η συνήθης πρακτική που εφαρμοζόταν στην βιομηχανία ζάχαρης κατά την συγκομιδή. Παρά τις συστάσεις προς την βιομηχανία ζάχαρης να σταματήσει την πρακτική καύσης των ζαχαρακαλάμων λόγω των σφαλμάτων που μπορεί να προκληθούν στις γραμμές μεταφοράς, δεν παρατηρήθηκε καμία πρόοδος καθώς οι συστάσεις δεν εφαρμόστηκαν. Για το λόγο αυτό, το 1998 νομοθετήθηκε απαγόρευση καύσης των ζαχαροκάλαμων κάτω από τις γραμμές μεταφοράς και σε απόσταση 15m από αυτές. Ταυτόχρονα η εταιρία ενέργειας προχώρησε σε συμφωνίες με τους αγρότες για φύτευση εναλλακτικών καλλιεργειών κοντά στις εναέριες γραμμές όπως είναι το καλαμπόκι, η σόγεια καθώς και φύτευση οπωρώνων δηλαδή βλάστησης μικρότερης επικινδυνότητας.

3.3 Η περίπτωση της Αυστραλίας

Στο Queensland της Αυστραλίας έχουν καταγραφεί σφάλματα σε εναέριες γραμμές προερχόμενα από πυρκαγιά σε αγροτικές περιοχές με καλλιέργειες ζαχαροτεύτλων εξαιτίας της καύσης τους. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα η επιχείρηση ηλεκτρισμού προχώρησε σε εργασίες ανύψωσης των εναέριων αγωγών 275kV κατά 6m. Παρόλο που τα σφάλματα στις γραμμές μεταφοράς εξαιτίας της πυρκαγιάς μειώθηκαν σημαντικά, το πρόβλημα δεν εξαλείφθηκε καθώς στην περίπτωση ισχυρής έντασης πυρκαγιάς συνέβαιναν σφάλματα. Επίσης στον περιορισμό των σφαλμάτων στις γραμμές μεταφοράς λόγω πυρκαγιάς έχει συμβάλλει τα τελευταία 15 χρόνια η χρήση μηχανικών μέσων κατά την συγκομιδή που έχει αντικαταστήσει την καύση των φυλλωμάτων. Επιπρόσθετο πλεονέκτημα από την αλλαγή του τρόπου συγκομιδής είναι ότι τα υπολείμματα από την μηχανική επεξεργασία των ζαχαροκάλαμων είτε παραμένουν στο έδαφος συμβάλλοντας στην λίπανσή του εδάφους είτε συλλέγονται και χρησιμοποιούνται ως καύσιμη ύλη από μικρά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

3.4 Η περίπτωση της Νοτίου Αφρικής

Στις γραμμές μεταφοράς της Νοτίου Αφρικής έχουν καταγραφεί σφάλματα οφειλόμενα στις πυρκαγιές σε φυτείες με ζαχροκάλαμα αλλά και σε πυρκαγιές χαμηλής βλάστησης (θάμνοι, χόρτα). Η ένταση της πυρκαγιάς και το ύψος της φλόγας διαφέρει αναλόγως του τύπου της βλάστησης που καίγεται καθώς και των καιρικών συνθηκών την στιγμή εκδήλωση της πυρκαγιάς.

Η ετήσια παραγωγή ζαχαροκάλαμου είναι 20 εκατομμύρια τόνοι και προέρχεται κυρίως από περιοχές της ανατολικής ακτογραμμής της Νοτίου Αφρικής. Το 8.4%

παράγεται από 14445 μικρούς παραγωγούς. Η απαγόρευση καλλιέργειας ζαχαροκάλαμου εντός της ζώνης δουλείας της γραμμής δημιουργεί σημαντικό πρόβλημα βιωσιμότητας των μικρών καλλιεργητών που συνήθως οι εκτάσεις τους δεν υπερβαίνουν το μισό εκτάριο.

Στην Νότια Αφρική η χρήση μηχανικών μέσων συγκομιδής των ζαχαροκάλαμων δεν αποτελεί εναλλακτικό τρόπο συγκομιδή λόγω του απαγορευτικού κόστους απόκτησής τους. Το κόστος απόκτησης μηχανικών μέσων συγκομιδής εκτιμήθηκε υψηλότερο από το κόστος αύξησης του ύψους των πύργων από την εταιρία ηλεκτρισμού. Επίσης η αύξηση τους ύψους των πύργων εκτιμήθηκε μικρότερο σε σχέση με την αποζημίωσης για την αποψίλωση των ζαχαροκάλαμων κάτω από τις γραμμές μεταφοράς. Επομένως, η πρακτική που εφαρμόζεται είναι οι αύξηση των αποστάσεων των εναέριων αγωγών από το έδαφος αλλά και μεταξύ τους στις περιοχές όπου οι εναέριες γραμμές οδεύουν πάνω από καλλιεργήσιμες εκτάσεις με ζαχαροκάλαμα.

3.5 Μέτρα περιορισμού της επίδρασης των δασικών πυρκαγιών σε γραμμές μεταφοράς

Σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζονται τα μέτρα που εφαρμόζονται από τις εταιρίες ηλεκτρικής ενέργειας ανά τον κόσμο προκειμένου να περιορίσουν τα σφάλματα στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που προκύπτουν στις εναέριες γραμμές εξαιτίας των δασικών πυρκαγιών.

3.5.1 Σχεδιασμός όδευσης νέων εναέριων γραμμών μεταφοράς

Η επιχείρηση ηλεκτρισμού αποφεύγει την εγκατάσταση νέων οδεύσεων εναέριων γραμμών σε περιοχές με υψηλή συχνότητα εκδήλωσης πυρκαγιών. Προκειμένου η προσέγγιση αυτή να είναι αποτελεσματική, απαιτείται η γνώση του ιστορικού εκδήλωσης πυρκαγιών την τελευταία δεκαετία. Για την απόκτηση της πληροφορίας αυτής μπορεί να χρησιμοποιηθούν δορυφορικά δεδομένα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή της περιοχής όπου πρόκειται να εγκατασταθούν οι νέες εναέριες γραμμές καθορίζεται από πρόσθετες παραμέτρους όπως είναι το κόστος, οι περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς και η εξασφάλιση των συνθηκών που επιτρέπουν την αξιόπιστη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας.

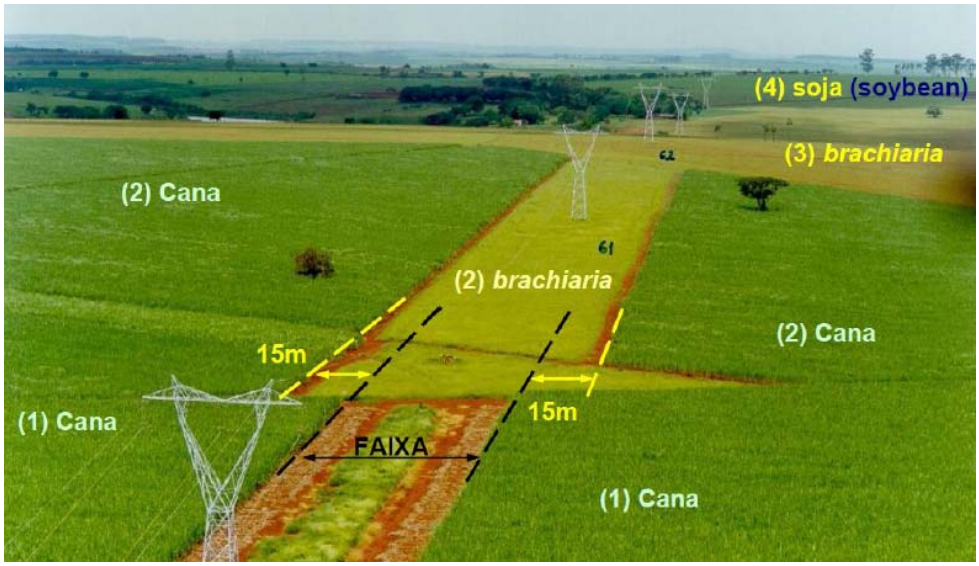
Η συνήθης πρακτική που εφαρμόζεται από την εταιρία ηλεκτρισμού της Νοτίου Αφρικής (Eskom) είναι η αποφυγή παράλληλων κυκλωμάτων σε κοντινές αποστάσεις. Επομένως στην περίπτωση εκδήλωσης πυρκαγιάς, η πρακτική αυτή αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποτελεσματική.

3.5.2 Διαχείριση βλάστησης

Στις περιοχές με αυξημένο κίνδυνο πυρκαγιάς, η επιχείρηση ηλεκτρισμού πρέπει να προβεί σε εργασίες περιορισμού ανάπτυξης της βλάστησης προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος πυρκαγιάς κάτω από αυτές. Για το θέμα αυτό υπάρχουν διάφορες πρακτικές, κάθε μια με τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η επικρατέστερη προσέγγιση που εφαρμόζεται είναι η αποψίλωση και κοπή των δέντρων στην ζώνη δουλείας. Εναλλακτικές προσεγγίσεις είναι η φύτευση κατάλληλης βλάστησης όπου η φωτιά δεν αποτελεί βασικό μέσο για την συγκομιδή, χρήση της ζώνης δουλεία ως αντιπυρική ζώνη. Το κόστος διαχείρισης της βλάστησης κάτω από τις εναέριες γραμμές είναι ιδιαίτερα υψηλό για την αποτελεσματικότητα των παραπάνω πρακτικών. Στον τεχνικό οδηγό 767 της Cigre περιγράφονται οι προσεγγίσεις που εφαρμόζονται από εταιρίες ηλεκτρικής ενέργειας για τον περιορισμό των επιπτώσεων της πυρκαγιάς

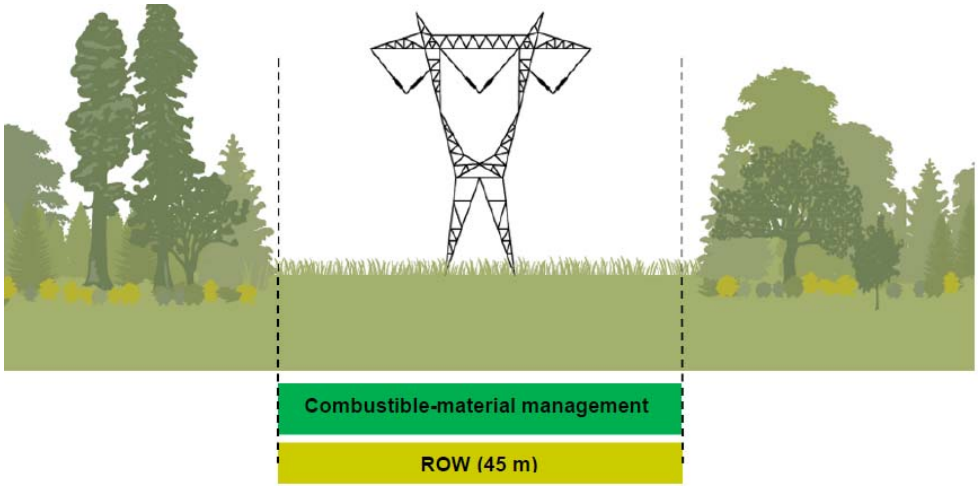
Στην περίπτωση της Βραζιλίας όπου κάτω από τις εναέριες γραμμές η βλάστηση που κυρίως συναντάται είναι ζαχαρότευτλα έχει εφαρμοστεί μια σειρά ενεργειών που έχουν συμβάλλει αποτελεσματικά στην μείωση των σφαλμάτων εξαιτίας της πυρκαγιάς. Οι ενέργειες αυτές είναι:

1. Από το 1999 απαγορεύονται οι φυτείες ζαχαροτεύτλων εντός της ζώνης δουλείας της εναέριας γραμμής
2. Δίδονται κίνητρα στους αγρότες προκειμένου να αντικαταστήσουν τις υπάρχουσες φυτείες ζαχαροτεύτλων με καλαμπόκι, σόγεια κ.λ.π.
3. Απαγόρευση της καύσης των ζαχαροτεύτλων εντός της ζώνης δουλείας της εναέριας γραμμής και σε απόσταση 15 μέτρα από αυτή (Σχήμα 3.1)
4. Περιοδικές εργασίες αποψίλωσης στις περιόδους ξηρασίας
5. Εκπαιδευτικές καμπάνιες ενημέρωσης



Σχήμα 3.1: Εναλλακτικές καλλιέργειες πλησίον των εναέριων γραμμών στην Βραζιλία.

Στην περίπτωση της Πορτογαλίας το 65% των γραμμών μεταφοράς οδεύει εντός δασικών εκτάσεων. Για το λόγο αυτό, από το 1992 η νομοθεσία τους προβλέπει ζώνη 45 μέτρων πλάτους (Σχήμα 3.2) δηλαδή όριο περιοχής 22.5 μ εκατέρωθεν του κέντρου της γραμμής μεταφοράς όπου τα δέντρα κόβονται προκειμένου να επιτευχθούν οι ελάχιστες αποστάσεις ασφαλείας.



Σχήμα 3.2: Εναέριες γραμμές μεταφοράς εντός δασικής περιοχής στην Πορτογαλία.





Σχήμα 3.3: Εναέριες γραμμές μεταφοράς εντός δασικής περιοχής στην Πορτογαλία.

Αντίστοιχα στις αγροτικές περιοχές η νομοθεσία απαγορεύει την φύτευση και την ύπαρξη δέντρων που μπορεί να αποτελέσουν κίνδυνο για την ασφάλεια των εναέριων γραμμών μεταφοράς. Η πρακτική αυτή συμβάλει στον γενικότερο σχεδιασμό πρόληψης και αντιμετώπισης δασικών πυρκαγιών και προστασίας του δάσους καθώς η ζώνη πλάτους 45 μ λειτουργεί ταυτόχρονα και ως αντιπυρική ζώνη.

Ταυτόχρονα, τα τελευταία χρόνια, η εταιρία ηλεκτρισμού της Πορτογαλίας, έχει προχωρήσει σε εναλλακτική εκμετάλλευση της γης που αφορά την περιοχή που καταλαμβάνει η ζώνη δουλείας της εναέριας γραμμής. Περίπου το 4,5% της συνολικής έκτασης της ζώνης δουλείας του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της Πορτογαλίας έχει φυτευτεί με χαμηλή βλάστηση και αποτελεί παραγωγική περιοχή με φύτευση οπωρώνων ή αμπελώνων ή και περιοχή βόσκησης των ζώων (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4: Φύτευση χαμηλής βλάστηση στην ζώνη δουλείας, σε γραμμές μεταφοράς στην Πορτογαλία.

3.6 Βιβλιογραφία

[1] CIGRE WG B2.45, “Vegetation fire characteristics and the potential impacts on overhead line performance,” 2019.

4. Αξιολόγηση της κατάστασης 150 kV συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης μετά την καταπόνησή τους από δασική πυρκαγιά

4.1 Εισαγωγή

Οι μονωτήρες υπαιθρίου χώρου που είναι εγκατεστημένοι στα εναέρια δίκτυα μεταφοράς είναι εκτεθειμένοι σε πλήθος παραγόντων καταπόνησης. Ένας από αυτούς είναι η πυρκαγιά που μπορεί να λάβει χώρα στη βλάστηση του εδάφους κάτω από τις εναέριες γραμμές μεταφοράς. Κατά την διάρκεια της πυρκαγιάς οι μονωτήρες καταπονούνται θερμικά από την εκλυόμενη θερμότητα ή/και τις φλόγες και επίσης ρυπαίνονται από τα προϊόντα της καύσης της βλάστησης. Επιπροσθέτως, μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή του αέρα λόγω μεταβολής της σύστασης του. Ο αέρας αποτελεί το βασικό μέσο μόνωσης τόσο μεταξύ των εναέριων γραμμών μεταφοράς όσο και μεταξύ των γραμμών μεταφοράς με τον γειωμένο μεταλλικό πύργο με αποτέλεσμα να μπορεί να συμβεί υπερπήδηση των μονωτήρων κατά την έκθεσή τους σε πυρκαγιά. Αποτέλεσμα της υπερπήδησης είναι η ηλεκτρική, θερμική και μηχανική καταπόνηση των μονωτήρων κατά την ανάπτυξη του ηλεκτρικού τόξου. Στην περίπτωση των συνθετικών μονωτήρων μπορεί να παρατηρηθεί μορφολογική αλλοίωση του πολυμερικού περιβλήματος ως αποτέλεσμα της θερμικής καταπόνησης. Η μορφολογική αλλοίωση του πολυμερικού περιβλήματος σχετίζεται με χημικές μεταβολές της σύνθεσής του, απόρροια της υποβάθμισης του πολυμερούς υλικού.

Στο κεφάλαιο αυτό αξιολογείται η κατάσταση 18 φυσικά γηρασμένων 150 kV συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης ακολούθως της έκθεσής τους σε δασική πυρκαγιά. Οι μονωτήρες λειτουργούσαν για 11 έτη από το 2010 έως το 2021 στο ηλεκτρικό σύστημα της νήσου Ρόδος. Προκειμένου να αξιολογηθούν οι επιπτώσεις της πυρκαγιάς στο πολυμερικό περίβλημα, εφαρμόζονται διάφορες μακροσκοπικές και μικροσκοπικές διαγνωστικές τεχνικές, συμπεριλαμβανομένων της οπτικής επιθεώρησης, μέτρησης της διαβροχής, της φασματοσκοπίας υπερύθρου με αποσβένουσα ολική ανάκλαση και οπτικής μικροσκοπίας.

4.2 Εργαστηριακή διερεύνηση

4.2.1 Συνθήκες λειτουργίας συνθετικών μονωτήρων

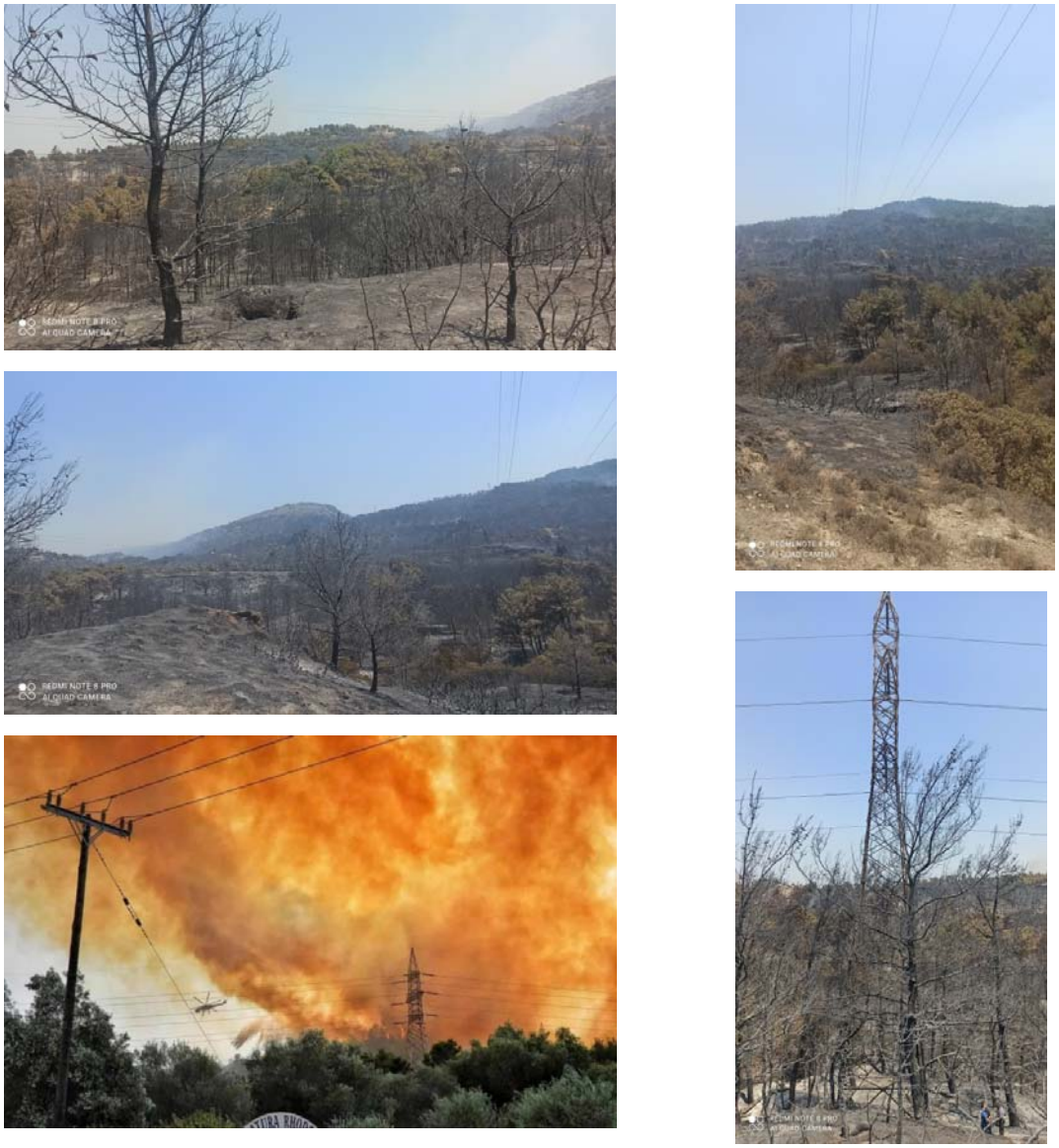
Οι συνθετικοί μονωτήρες που διερευνώνται προσφέρθηκαν από τον διαχειριστή ελληνικού δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ) στα πλαίσια του ερευνητικού έργου PoweR-LIBS. Οι συνθετικοί μονωτήρες ανάρτησης λειτουργούσαν για 11 έτη (2010-2021) σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας στην εναέρια γραμμή 150 kV Σορωνή – Γεννάδι του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της Ρόδου (Σχήμα 4.1). Οι γραμμές που λειτουργούσαν ήταν εντός δασικής περιοχής κοντά στην Σορωνή στην οποία εκδηλώθηκε πυρκαγιά τον Αύγουστο 2021.



Σχήμα 4.1. Δίκτυο Μεταφοράς 150 kV, νήσου Ρόδος, με κόκκινο περίγραμμα η περιοχή εγκατάστασης των μονωτήρων που διερευνώνται.

Δεδομένου ότι τα εναέρια πυροσβεστικά μέσα δεν μπορούσαν να επιχειρήσουν ρίψεις νερού κατά μήκος της εναέριας γραμμής καθώς θα μπορούσε να προκύψει μηχανική αστοχία της δομής υποστήριξης των εναέριων γραμμών, οι μονωτήρες και γενικότερα ο εγκατεστημένος εξοπλισμός πλησίον της περιοχής όπου εκδηλώθηκε η πυρκαγιά υπέστησαν ισχυρή θερμική καταπόνηση. Στις εικόνες του Σχήματος 4.2 παρουσιάζονται φωτογραφίες που ελήφθησαν στο τμήμα της εναέριας γραμμής που υπέστη φθορά από την πυρκαγιά.

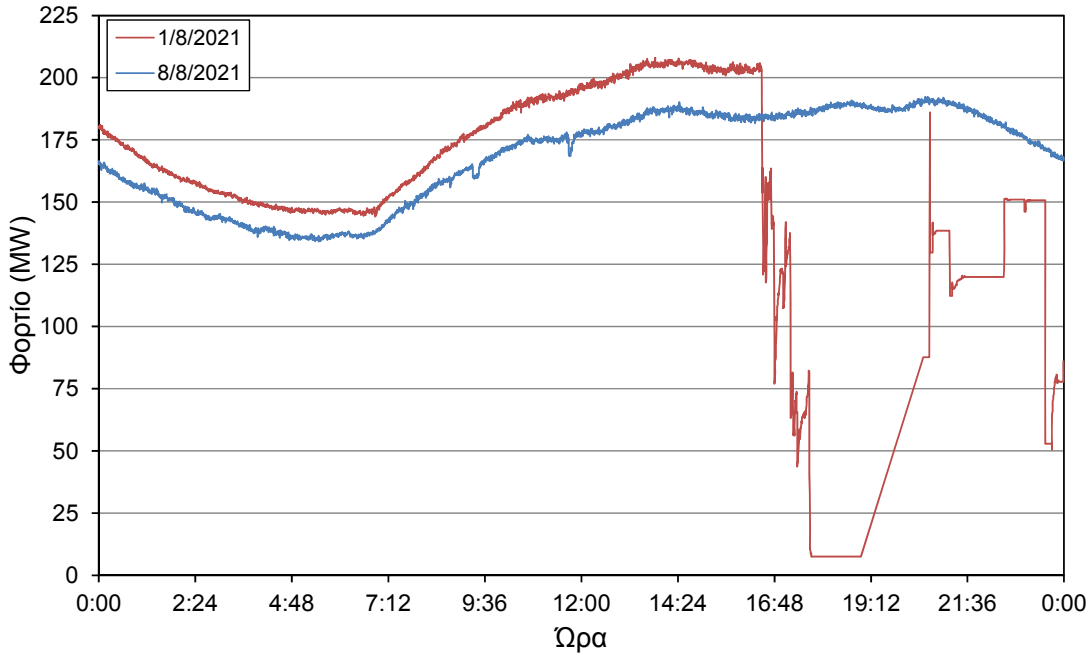
Εξαιτίας της έντασης και της έκτασης της πυρκαγιάς συνέβη υπερπήδηση σε κάποιο/α στοιχεία του εγκατεστημένου εξοπλισμού, πιθανόν μονωτήρα, στο συγκεκριμένο τμήμα της γραμμής με αποτέλεσμα τη διακοπή της ηλεκτροδότησης όλης της γραμμής λόγω λειτουργίας των μέσων προστασίας. Να σημειωθεί ότι λόγω της σχεδίασης του συστήματος προστασίας (τριπολική απόζευξη) και σε συνδυασμό με την γεωγραφική κατανομή της παραγωγής και της κατανάλωσης ενέργειας (η



Σχήμα 4.2. Τμήματα των εναέριων γραμμών μεταφοράς του ηλεκτρικού συστήματος της Ρόδου που υπέστησαν φθορά από την δασική πυρκαγιά τον Αύγουστο του 2021.

πλειοψηφία των καταναλώσεων είναι στο βόρειο τμήμα του νησιού, ενώ η παραγωγή στο νότιο), προέκυψε αποσυγχρονισμός του ηλεκτρικού συστήματος με αποτέλεσμα την ολική διακοπή ηλεκτροδότησης της νήσου Ρόδος.

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζονται δεδομένα που αφορούν το φορτίο του ηλεκτρικού συστήματος της Ρόδου την ημέρα που ξέσπασε η πυρκαγιά, δηλαδή για την 01/08/2021, καθώς και αυτά για τις 08/08/2021, χαρακτηριστικό φορτίο μιας τυπικής καλοκαιρινής ημέρας.



Σχήμα 4.3. Φορτίο ηλεκτρικού συστήματος νήσου Ρόδου την ημέρα της πυρκαγίας (01/08/2021) και μετά από μια βδομάδα (08/08/2021).

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.3, με μπλε γραμμή απεικονίζεται το φορτίο του ηλεκτρικού συστήματος για μια τυπική ημέρα του Αυγούστου και με κόκκινη το φορτίο την ημέρα που ξέσπασε η πυρκαγιά. Είναι εμφανές ότι η πυρκαγιά επηρέασε το ηλεκτρικό σύστημα περίπου στις 16.30 προκαλώντας αρχικά μερική διακοπή ηλεκτροδότησης σε τμήματα του νησιού, προφανώς λόγω απομόνωσης τμήματος των γραμμών μεταφοράς. Έκτοτε, παρατηρείται έντονη αστάθεια στο φορτίο που οφείλεται στην διακοπή ηλεκτροδότησης πρόσθετων γραμμών μεταφοράς έως και τις 17.40, όταν συνέβη ολική διακοπή της ηλεκτροδότησης, που είχε ως αποτέλεσμα τον αποσυγχρονισμό του δικτύου. Τέλος στις 18.55, παρατηρείται η προσπάθεια επαναφοράς και τμηματικής αποκατάστασης της ηλεκτροδότησης του ηλεκτρικού συστήματος.

Την επόμενη ημέρα, δηλαδή στις 02/08/2022, αμέσως μετά την κατάσβεση της πυρκαγιάς, το συνεργείο Γραμμών Μεταφοράς του Ηλεκτρικού Συστήματος Κρήτης –Ρόδου του ΔΕΔΔΗΕ διεξήγαγαν αυτοψία κυρίως μέσω οπτικής επιθεώρησης στα τμημάτα των γραμμών μεταφοράς που βρισκόταν στην περιοχή εκδήλωσης της

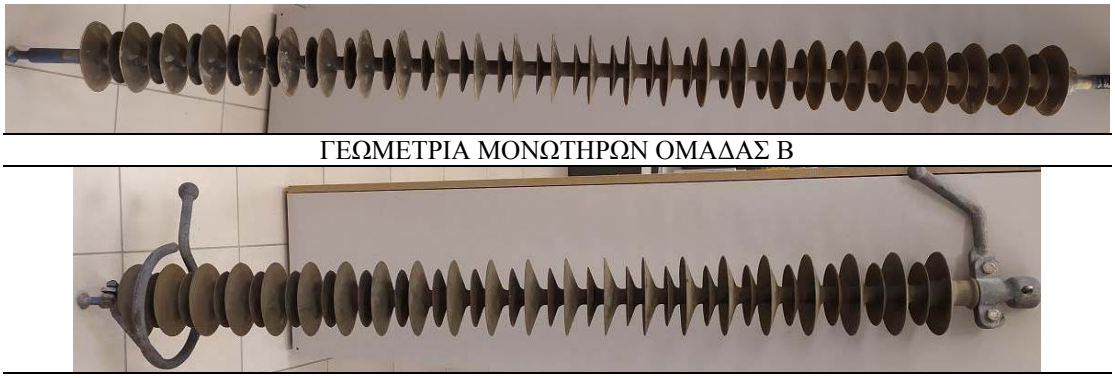
δασικής πυρκαγιάς. Βάσει των αποτελεσμάτων της οπτικής επιθεώρησης του εγκατεστημένου εξοπλισμού, στο τμήμα της γραμμής μεταφοράς που υπέστη φθορά από την πυρκαγιά, αποφασίστηκε από τον ΔΕΔΔΗΕ προληπτική αντικατάσταση όλων των μονωτήρων κυρίως λόγω των μορφολογικών αλλοιώσεων και της αλλαγής χρωματισμού του πολυμερικού περιβλήματός τους. Οι μορφολογικές αλλοιώσεις που εντοπίστηκαν μπορούν να αποδοθούν στην θερμική καταπόνηση του πολυμερικού περιβλήματος αλλά και στην συγκέντρωση προϊόντων καύσης.

4.2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά συνθετικών μονωτήρων

Οι μονωτήρες που διερευνώνται αποτελούνταν από τον συνθετικό πυρήνα, το πολυμερικό περίβλημα (High Temperature Vulcanized Silicone Rubber, HTV SIR) και τους εν θερμώ γαλβανισμένους μεταλλικούς ακροδέκτες. Τα ηλεκτρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των μονωτήρων ήταν σύμφωνα με τις προδιαγραφές IEC 60383 [1] και IEC 61109 [2], αντιστοίχως, και οι μεταλλικοί ακροδέκτες με την προδιαγραφή IEC 60120 [3]. Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των μονωτήρων που αξιολογούνται. Με βάση το ειδικό ενιαίο μήκος ερπυσμού τους οι μονωτήρες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε 2 ομάδες. Η ομάδα Α αποτελείται από τους μονωτήρες P1, P3, P4, P5, P7, P8, P9, P10, P11,P12, P13, P14, P15, P16, P17 και P18 με ενιαίο ειδικό μήκος ερπυσμού 73.23 mm/ kV , ενώ η ομάδα Β από τους P2 και P6 με ενιαίο ειδικό μήκος ερπυσμού 57.55 mm/ kV. Οι μονωτήρες της Ομάδας Α είναι κατασκευασμένοι από την εταιρία BONOMI ενώ της Ομάδας Β από την εταιρία ISOELECTRIC.

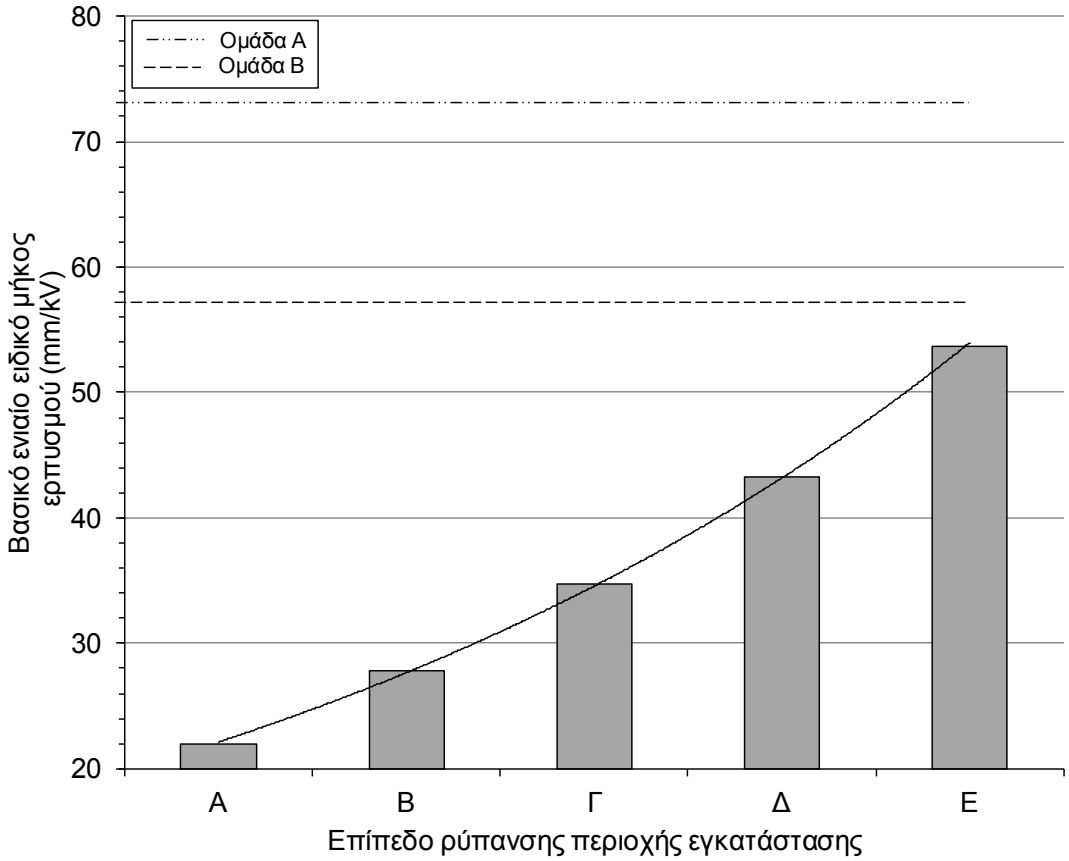
Μονωτήρας	Υλικό περιβλήματος	Διάμετρος μικρών/ μεγάλων (μm)	Αριθμός μικρών/ μεγάλων πτερυγίων	Συνολικό μήκος (mm)	Απόσταση ηλεκτρικού τόξου (mm)	Μήκος ερπυσμού (mm)	Ενιαίο ειδικό μήκος ερπυσμού (mm/kV)
P1	HTV SIR	100/ 150	25/ 26	2240	1940	6350	73.23
P2	HTV SIR	110/ 150	21/ 22	1870	1570	4990	57.55
P3	HTV SIR	100/ 150	25/ 26	2240	1940	6350	73.23
P4	HTV SIR	100/ 150	25/ 26	2240	1940	6350	73.23
P5	HTV SIR	100/ 150	25/ 26	2240	1940	6350	73.23
P6	HTV SIR	110/ 150	21/ 22	1870	1570	4990	57.55
P7	HTV SIR	100/ 150	25/ 26	2240	1940	6350	73.23
P8	HTV SIR	100/ 150	25/ 26	2240	1940	6350	73.23
P9	HTV SIR	100/ 150	25/ 26	2240	1940	6350	73.23
P10	HTV SIR	100/ 150	25/ 26	2240	1940	6350	73.23
P11	HTV SIR	100/ 150	25/ 26	2240	1940	6350	73.23
P12	HTV SIR	100/ 150	25/ 26	2240	1940	6350	73.23
P13	HTV SIR	100/ 150	25/ 26	2240	1940	6350	73.23
P14	HTV SIR	100/ 150	25/ 26	2240	1940	6350	73.23
P15	HTV SIR	100/ 150	25/ 26	2240	1940	6350	73.23
P16	HTV SIR	100/ 150	25/ 26	2240	1940	6250	73.23
P17	HTV SIR	100/ 150	25/ 26	2240	1940	6350	73.23
P18	HTV SIR	100/ 150	25/ 26	2240	1940	6350	73.23

ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ ΟΜΑΔΑΣ Α



Σχήμα 4.4. Χαρακτηριστικά των 150 kV HTV SIR μονωτήρων ανάρτησης.

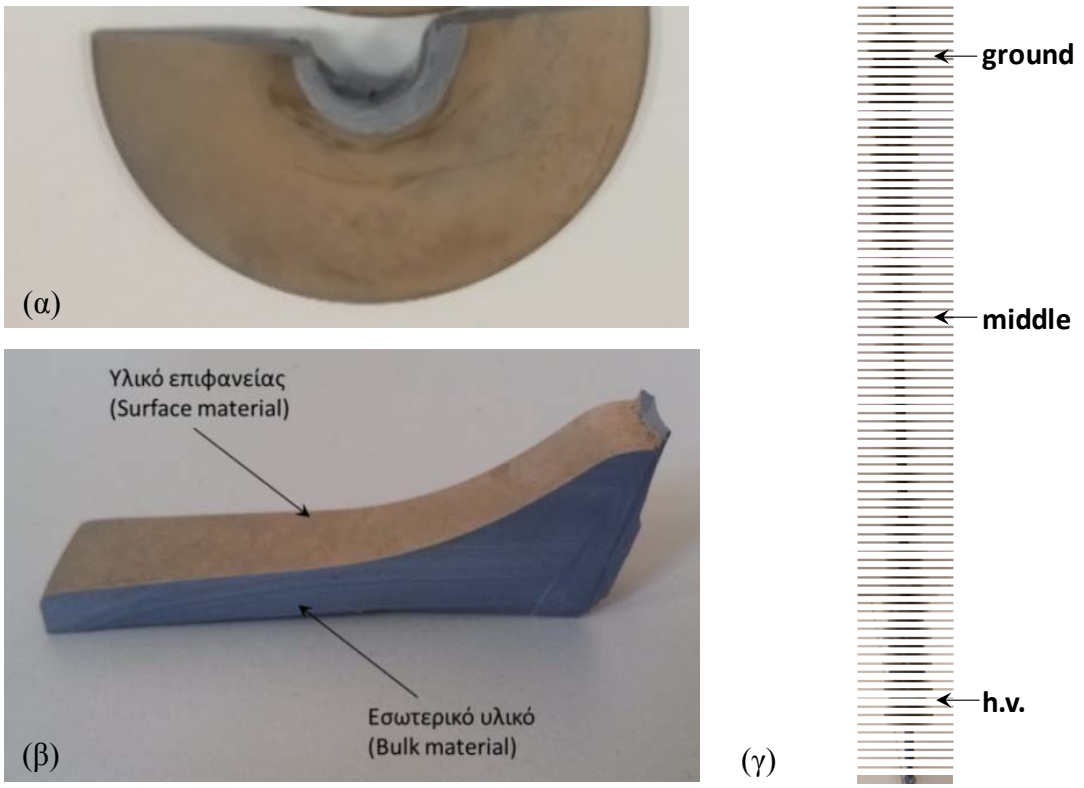
Από την σύγκριση του ενιαίου ειδικού μήκους ερπυσμού των μονωτήρων (Σχήμα 1.4) σε σχέση με το βασικό ενιαίο ειδικό μήκος ερπυσμού των μονωτήρων, όπως ορίζεται από το πρότυπο IEC 60815-3 [4] (Σχήμα 4.5), προκύπτει ότι υπερκαλύπτουν την απαίτηση για λειτουργία σε περιοχή με «πολύ βαριά» ρύπανση, συνεπώς πληρούν τις προδιαγραφές λειτουργίας ακόμη και στις δυσμενέστερες συνθήκες ρύπανσης.



Σχήμα 4.5. Συσχέτιση ελάχιστου ενιαίου ειδικού μήκους ερπυσμού μονωτήρων με το επίπεδο ρύπανσης της περιοχής εγκατάστασης. Διαβάθμιση ρύπανσης της περιοχής (SPS class): (Α) πολύ ελαφριά, (Β) ελαφριά, (Γ) μεσαία, (Δ) βαριά, (Ε) πολύ βαριά [4].

4.2.3 Διαγνωστικές τεχνικές αξιολόγησης της κατάστασης των μονωτήρων

Για την αξιολόγηση των θερμικών επιπτώσεων της πυρκαγιάς στην λειτουργική κατάσταση των μονωτήρων μετά την απεγκατάστασή τους από τις εναέριες 3 γραμμές μεταφοράς, εφαρμόστηκαν διάφορες διαγνωστικές τεχνικές Πίνακας 4.1. Συγκεκριμένα, αξιολογήθηκε η λειτουργική κατάσταση των μονωτήρων διενεργώντας οπτική επιθεώρηση, μετρήσεις διαβροχής τόσο με την μέθοδο του ψεκασμού όσο και με την μέθοδο μέτρησης της στατικής γωνίας επαφής, μετρήσεις φασματοσκοπίας υπερύθρου με αποσβένουσα ολική ανάκλαση καθώς και μετρήσεις οπτικής μικροσκοπίας. Οι μετρήσεις της γωνίας επαφής, φασματοσκοπίας υπερύθρου με αποσβένουσα ολική ανάκλαση, οπτικής μικροσκοπίας διεξήχθησαν στο εσωτερικό υλικό (bulk material) και στο υλικό επιφανείας (surface material) δειγμάτων που ελήφθησαν κατά μήκος του πολυμερικού περιβλήματος του μονωτήρα (Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4.6. α) Δείγμα από πολυμερικό περίβλημα (ημι-πτερύγιο), β) υλικό επιφανείας και εσωτερικό υλικό δείγματος, γ) περιοχές δειγματοληψίας.

Τα δείγματα ελήφθησαν από τρεις (3) περιοχές κατά μήκος του πολυμερικού περιβλήματος. Το δείγμα ground ελήφθη από πτερύγιο πλησίον του ακροδέκτη γείωσης, το δείγμα middle ελήφθη από πτερύγιο στην μέση περιοχή του περιβλήματος και το δείγμα h.v., από πτερύγιο πλησίον του ακροδέκτη υψηλής τάσης (150kV) (Σχήμα 4.6). Επιπροσθέτως, για την ακριβή θέση των πτερυγίων που εξετάζονται, τα πτερύγια αριθμούνται, ξεκινώντας την αρίθμηση από το πτερύγιο πλησίον του ακροδέκτη γείωσης του μονωτήρα. Οι μετρήσεις στο εσωτερικό υλικό

των δειγμάτων λαμβάνονται ως αναφορά καθώς το υλικό επιφανείας αναμένεται να έχει επηρεαστεί περισσότερο από τις θερμικές επιπτώσεις της πυρκαγιάς.

Πίνακας 4.1 Τεχνικές αξιολόγησης της κατάστασης του μονωτήρα.

Διαγνωστικές τεχνικές	Περιοχή διερεύνησης του μονωτήρα
Οπτική επιθεώρηση	Μεταλλικοί ακροδέκτες, πολυμερικό περίβλημα, κεράτια απαγωγής τόξου
Διαβάθμιση της διαβροχής, Μέθοδος ψεκασμού	Πολυμερικό περίβλημα
Διαβάθμιση της διαβροχής, Μέθοδος γωνίας επαφής, FTIR-ATR, οπτική μικροσκοπία	Δείγματα κατά μήκος του πολυμερικού περιβλήματος

. Ειδικότερα:

Οπτική επιθεώρηση

Η οπτική επιθεώρηση διενεργήθηκε σύμφωνα με τα κριτήρια αξιολόγησης της κατάστασης των μονωτήρων που περιγράφονται στις τεχνικές οδηγίες οπτικής επιθεώρησης συνθετικών μονωτήρων που έχουν εκδοθεί από το Swedish Transmission Research Institute (STRI) [5] και το Electric Power Research Institute (EPRI) [6].

Μέτρηση διαβροχής

Η διαβροχή της επιφάνειας του πολυμερικού περιβλήματος των μονωτήρων αξιολογήθηκε εφαρμόζοντας την «μέθοδο ψεκασμού» και την «μέθοδο γωνίας επαφής» σύμφωνα με την τεχνική οδηγία IEC 62073 [7]. Η μέθοδος του ψεκασμού εφαρμόστηκε σε όλη την επιφάνεια του πολυμερικού περιβλήματος πριν την αφαίρεση της επιφανειακής ρύπανσής του. Οι μετρήσεις της γωνίας επαφής διεξήχθησαν με την βοήθεια του γωνιόμετρου CAM 101 της εταιρείας KSV Instruments Ltd. (Höyläämötie 7, 00380, Helsinki) (Σχήμα 4.7) τόσο στο εσωτερικό υλικό όσο και από το υλικό επιφανείας (Σχήμα 4.6 β) σε τρία (3) δείγματα (ground, middle, h.v.) που ελήφθησαν κατά μήκος του πολυμερικού περιβλήματος. Μετρήθηκε η στατική γωνία επαφής τόσο στην άνω επιφάνεια (top surface) του δείγματος όσο και στην κάτω (bottom surface).

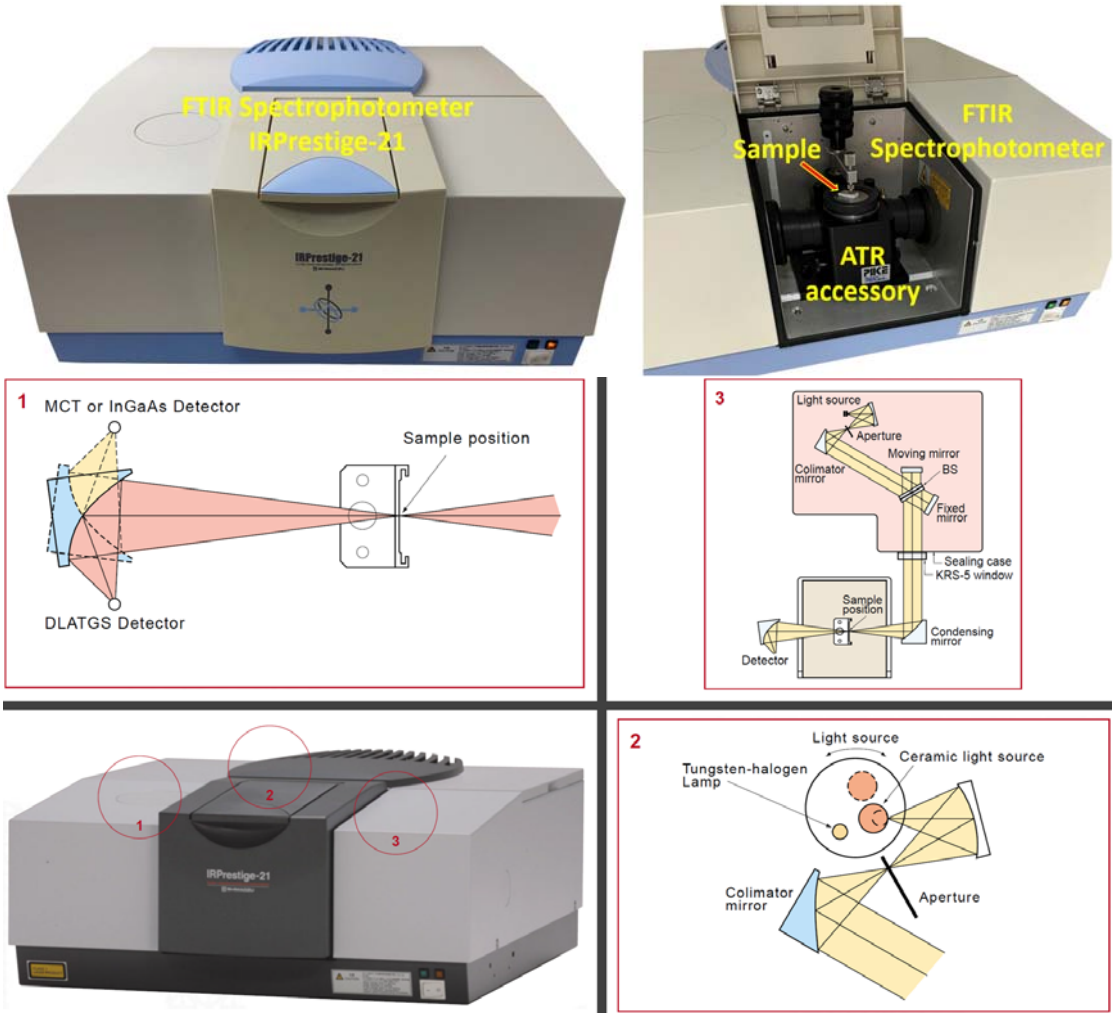


Σχήμα 4.7. Πειραματική διάταξη μέτρησης γωνίας επαφής (KSV Instruments's CAM 101)

Οι μετρήσεις της στατικής γωνίας επαφής διεξήχθησαν με την εναπόθεση σταγόνων νερού (~10 μl) στην επιφάνεια των δειγμάτων εφαρμόζοντας την μέθοδο της επικαθήμενης σταγόνας. Για κάθε δείγμα πραγματοποιήθηκαν πέντε (5) επαναλαμβανόμενες μετρήσεις των γωνιών επαφής τόσο στο εσωτερικό υλικό όσο και στο υλικό επιφανείας και υπολογίστηκε ο μέσος όρος των μετρήσεων. Το αποτέλεσμα της συγκεκριμένης μέτρησης είναι χαρακτηριστικό της σταθερότητας της υδροφοβίας του μονωτήρα. Να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις διενεργήθηκαν χωρίς να αφαιρεθεί η επιφανειακή ρύπανση, συνεπώς αξιολογείται πέραν της ικανότητας διαβροχής του μονωτήρα και η ικανότητα μεταφοράς της υδροφοβίας (hydrophobicity transfer) στους επιφανειακούς ρύπους.

Φασματοσκοπία υπερύθρου με αποσβένουσα ολική ανάκλαση

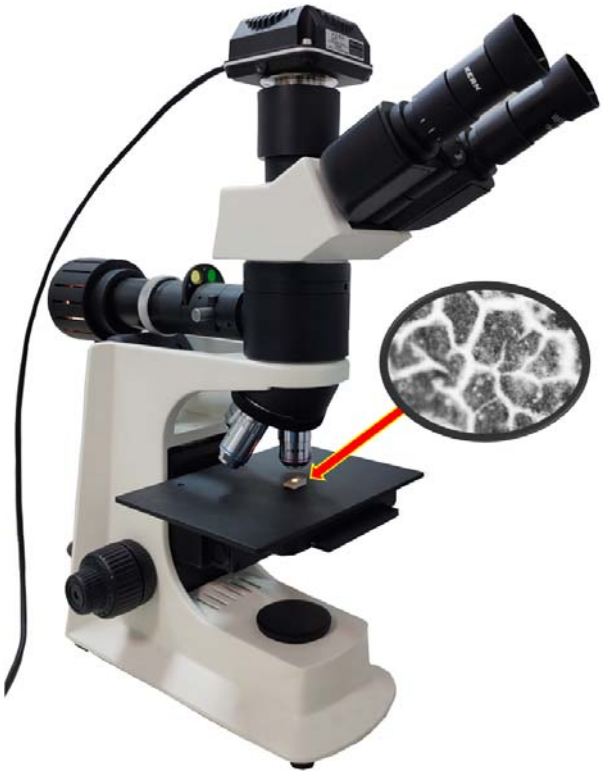
Οι μετρήσεις διεξήχθησαν με την βοήθεια του υπέρυθρου φασματογράφου IR Prestige-21 της εταιρείας Shimadzu Europa GmbH, που φέρει εξοπλισμό αποσβένουσας ολικής ανάκλασης single-bounce reflection MIRacle ATR της εταιρείας PIKE Technologies (6125 Cottonwood Dr, Fitchburg, WI 53719, USA) υψηλής απόδοσης διείσδυσης υπερύθρων, με κρυστάλλινη πλάκα single reflection Diamond/ZnSe με πρίσμα διαμέτρου 1.8 mm και σφιγκτήρα υψηλής πίεσης (max 10,141 psi) (Σχήμα 4.8). Ο φασματογράφος ρυθμίστηκε στις 20 σαρώσεις, ανάλυση 4 cm^{-1}, εύρος κυματάριθμων από 4000-400 cm^{-1}. Το βάθος διείσδυσης βάσει των προδιαγραφών του κατασκευαστή δίνεται στα 2 μm στις 45^{o}, για το συγκεκριμένο εύρος των κυματαριθμών που εξετάστηκε. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο εσωτερικό υλικό και στο υλικό επιφανείας 3 δειγμάτων που ελήφθησαν κατά μήκος του πολυμερικού περιβλήματος.



Σχήμα 4.8. Υπέρυθρος φασματογράφος IR Prestige-21 μαζί με Miracle ATR, επιμέρους εξαρτήματα της λειτουργίας του υπέρυθρου φασματογράφου.

Οπτική μικροσκοπία

Οι μετρήσεις διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας το οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο OKM-1 της εταιρείας KERN (Γερμανία) (Σχήμα 4.9) για αδιαφανή υλικά, με πέντε χρωματικά φίλτρα φωτός για καλύτερη αντίθεση και με φίλτρο πόλωσης για τη μείωση των αντανακλάσεων από τις γυαλιστερές επιφάνειες στο υλικό επιφανείας και στο εσωτερικό υλικό των δειγμάτων που ελήφθησαν κατά μήκος του πολυμερικού περιβλήματος σε 4 μεγεθύνσεις με αντικειμενικούς αχρωματικούς φακούς Infinity Plan (οπτική διόρθωση επίπεδου πεδίου) 5x, 10x, LWD20x και LWD40x, προκειμένου να διερευνηθεί η μορφολογική κατάσταση του πολυμερικού περιβλήματος των μονωτήρων.



Σχήμα 4.9. Οπτικό μικροσκόπιο OKM-1 της εταιρείας KERN (Γερμανία).

Το οπτικό μικροσκόπιο φέρει τριοφθάλμιο οπτικό σωλήνα τύπου Siedentopf 30° κεκλιμένο/360° περιστροφικό μαζί με προσαρμογέα κάμερας τύπου C-Mount μεγέθυνσης 0.50x όπου έχει προσαρτηθεί πάνω του μία έγχρωμη C-Mount κάμερα KERN ODC832 της ίδιας εταιρείας με αισθητήρα CMOS μεγέθους 1/2.5", με 5.1 MP ανάλυση εικόνων. Το μέγεθος των αποθηκευμένων εικόνων που καταγράφονται μέσω της κάμερας στον ηλεκτρονικό υπολογιστή και με τη χρήση του προγράμματος διαχείρισης των εικόνων (MicroscopeVIS) του μικροσκοπίου αντιστοιχεί σε 2560×1922 pixels. Οι διαστάσεις της επιφάνειας εργασίας είναι 200x140 mm και η διαδρομή που μπορεί να κάνει είναι 76x52 mm. Ο ρυθμιζόμενος φωτισμός της προσπίπτουσας ακτινοβολίας πάνω από την επιφάνεια εργασίας παρέχεται μέσω μίας λάμπας αλογόνου 30W. Σύμφωνα με τις διαστάσεις σε pixels των εικόνων και μέσω της βαθμονόμησης με την μικρομετρική κλίμακα που έλαβε μέρος, οι πραγματικές διαστάσεις των εικόνων σε μm για κάθε περιοχή μεγέθυνσης των αντικειμενικών φακών, αντιστοιχούν στις τιμές που δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.2 Μεγέθυνση και μικρομετρική κλίμακα.

Magnification and Scaling Results						
Magnification	**Scale Bar (μm)**	**Scale (pixels/μm)**	**Image Size**			
			Width (pixels)	**Height (pixels)**	**Width (μm)**	**Height (μm)**
5x	400	0.8503	2560	1922	3010.65	2260.34
10x	200	2.1751	2560	1922	1176.98	883.65
20x	100	4.2798	2560	1922	598.16	449.09
40x	50	8.4780	2560	1922	301.96	226.70

4.3 Αποτελέσματα

4.3.1 Οπτική επιθεώρηση

Η οπτική επιθεώρηση διεξήχθη λαμβάνοντας υπόψη τα κριτήρια αξιολόγησης της κατάστασης των μονωτήρων που περιγράφονται στις τεχνικές οδηγίες STRI [5] και EPRI [6].

Για κάθε ένα μονωτήρα που αξιολογήθηκε παρουσιάζονται εικόνες με βάση τα ευρήματα που διαπιστώθηκαν αμέσως μετά την απεγκατάστασή τους από το δίκτυο.

4.3.1.1 Μονωτήρας P1

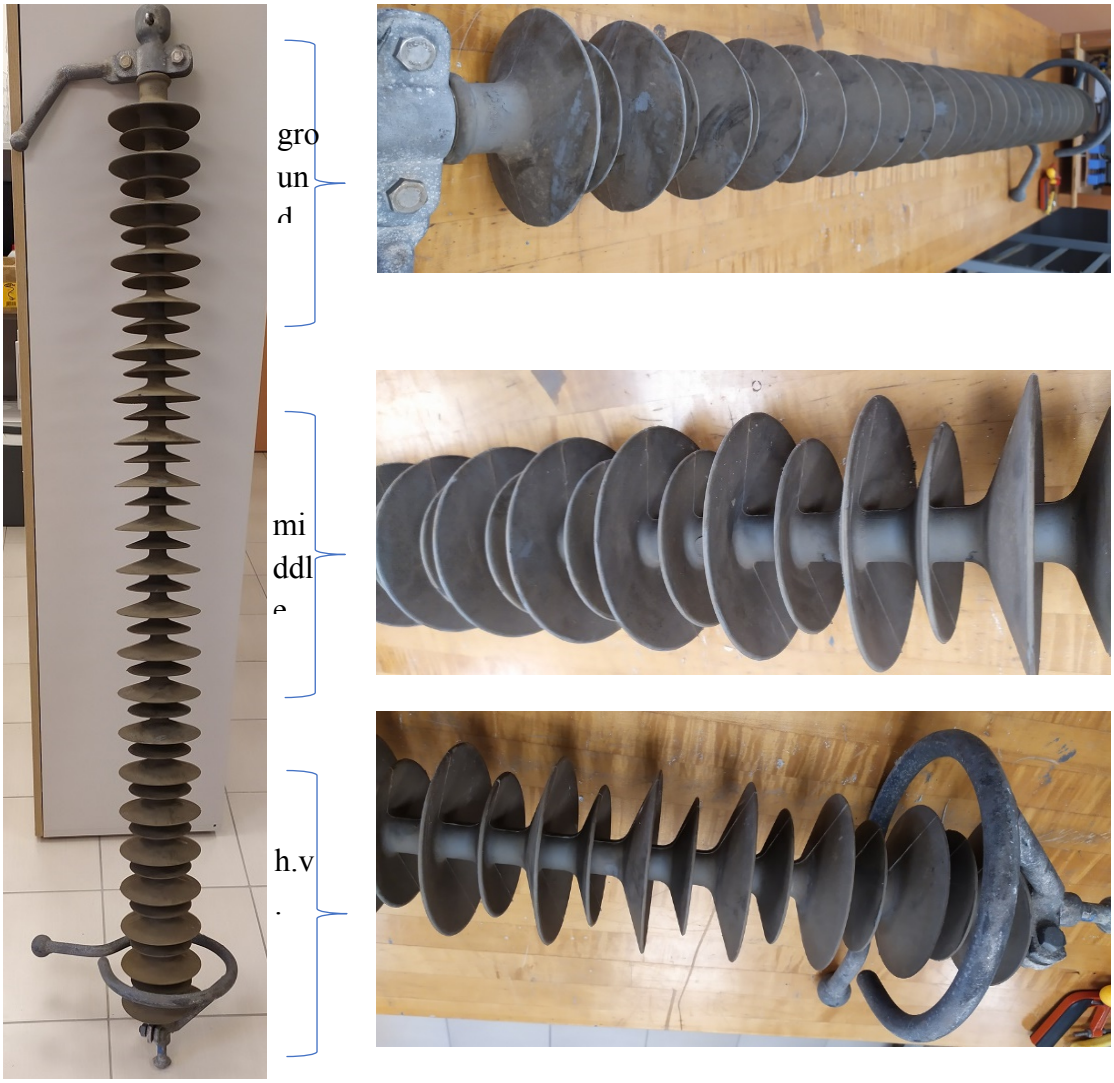
Ίχνη καύσης, μέτριας έντασης. εντοπίζονται κυρίως στα πτερύγια του πολυμερικού περιβλήματος πλησίον του ακροδέκτη υψηλής τάσης.



Σχήμα 4.10. Μονωτήρας P1 – Οπτική Επιθεώρηση

4.3.1.2 Μονωτήρας P2

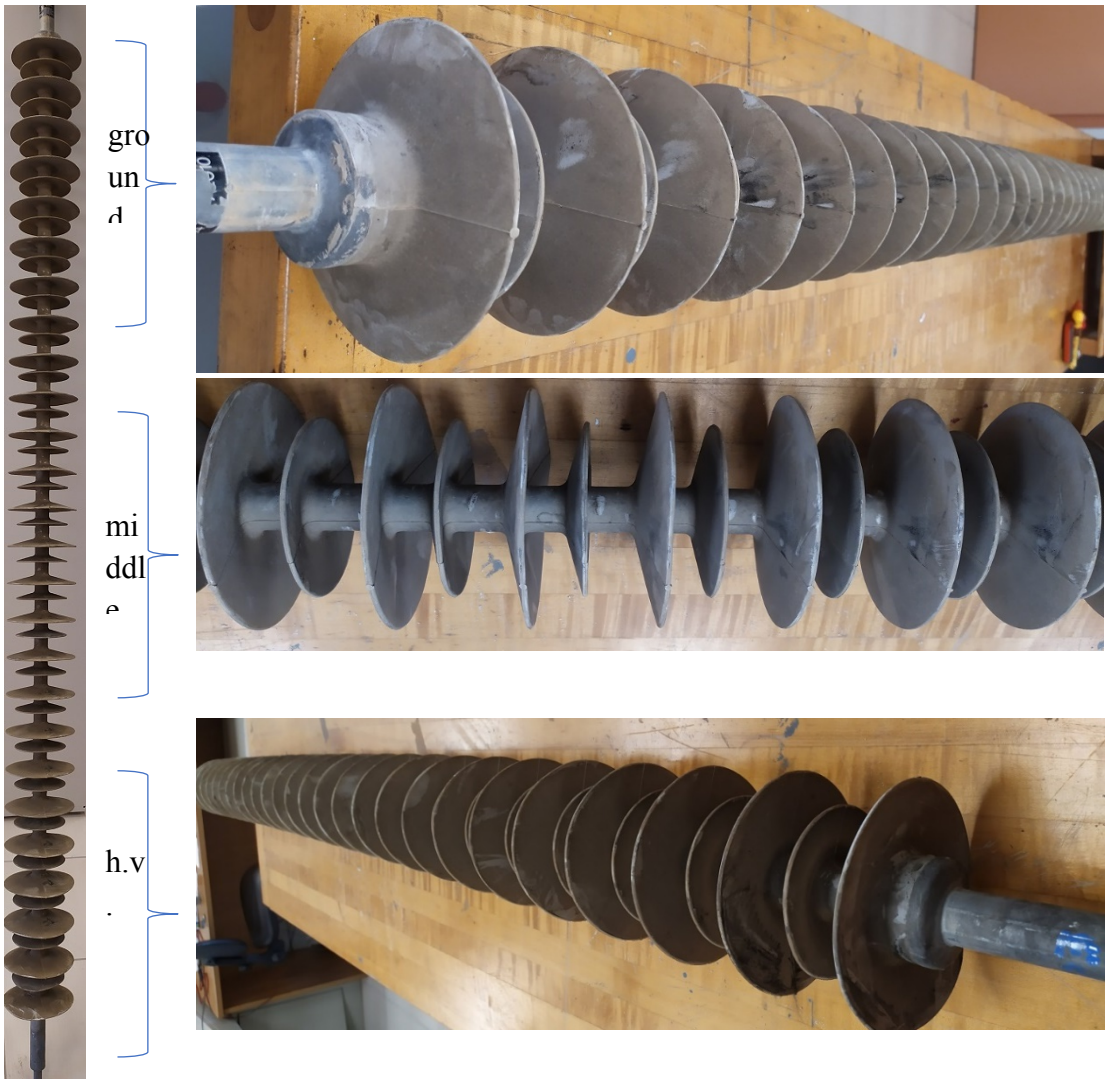
Δεν εντοπίζονται ίχνη καύσης στο πολυμερικό περίβλημα, παρά μόνο ρύπανση.



Σχήμα 4.11. Μονωτήρας P2 – Οπτική Επιθεώρηση

4.3.1.3 Μονωτήρας P3

Ίχνη καύσης, ασθενούς έντασης, εντοπίζονται κατά μήκος του πολυμερικού περιβλήματος.



Σχήμα 4.12. Μονωτήρας P3 – Οπτική Επιθεώρηση

4.3.1.4 Μονωτήρας P4

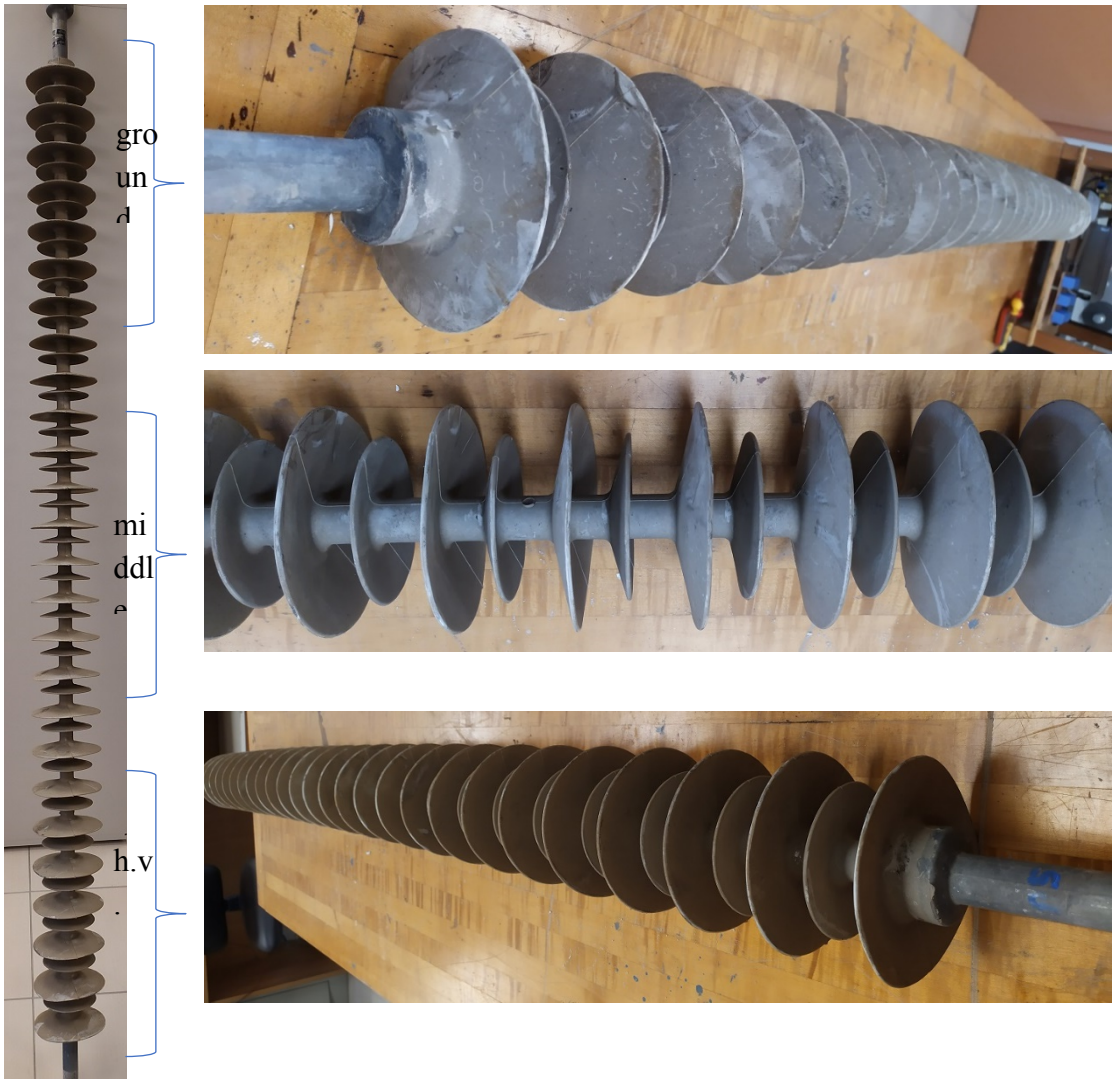
Ίχνη καύσης, μέτριας έντασης, εντοπίζονται σε όλο το μήκος του πολυμερικού περιβλήματος.



Σχήμα 4.13. Μονωτήρας P4 – Οπτική Επιθεώρηση

4.3.1.5 Μονωτήρας P5

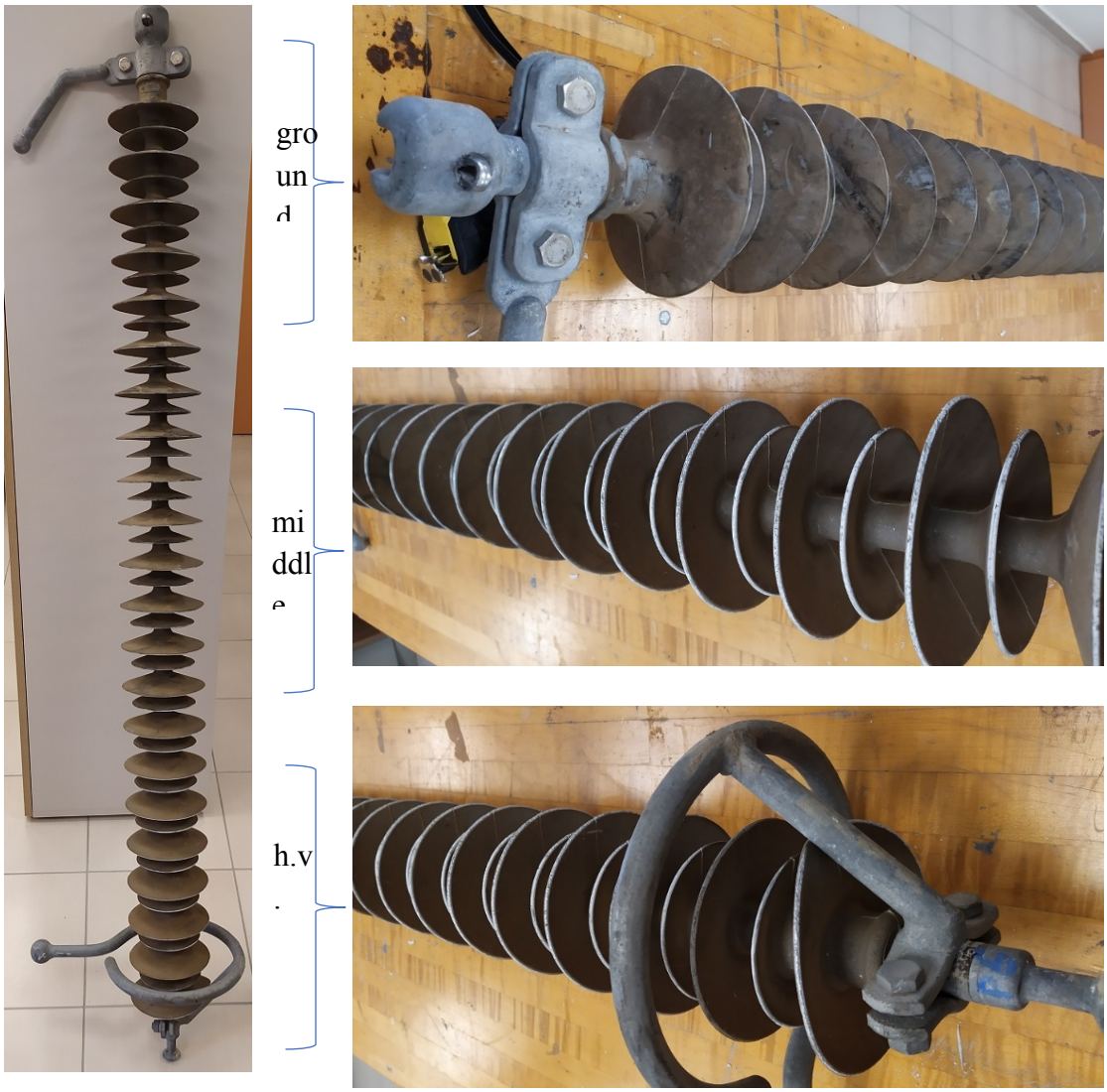
Δεν εντοπίζονται ίχνη καύσης στο πολυμερικό περίβλημα, παρά μόνο ρύπανση.



Σχήμα 4.14. Μονωτήρας P5 – Οπτική Επιθεώρηση

4.3.1.6 Μονωτήρας P6

Ίχνη καύσης, μέτριας έντασης, εντοπίζονται κυρίως στα πτερύγια του πολυμερικού περιβλήματος πλησίον του ακροδέκτη γείωσης.



Σχήμα 4.15. Μονωτήρας P6 – Οπτική Επιθεώρηση

4.3.1.7 Μονωτήρας P7

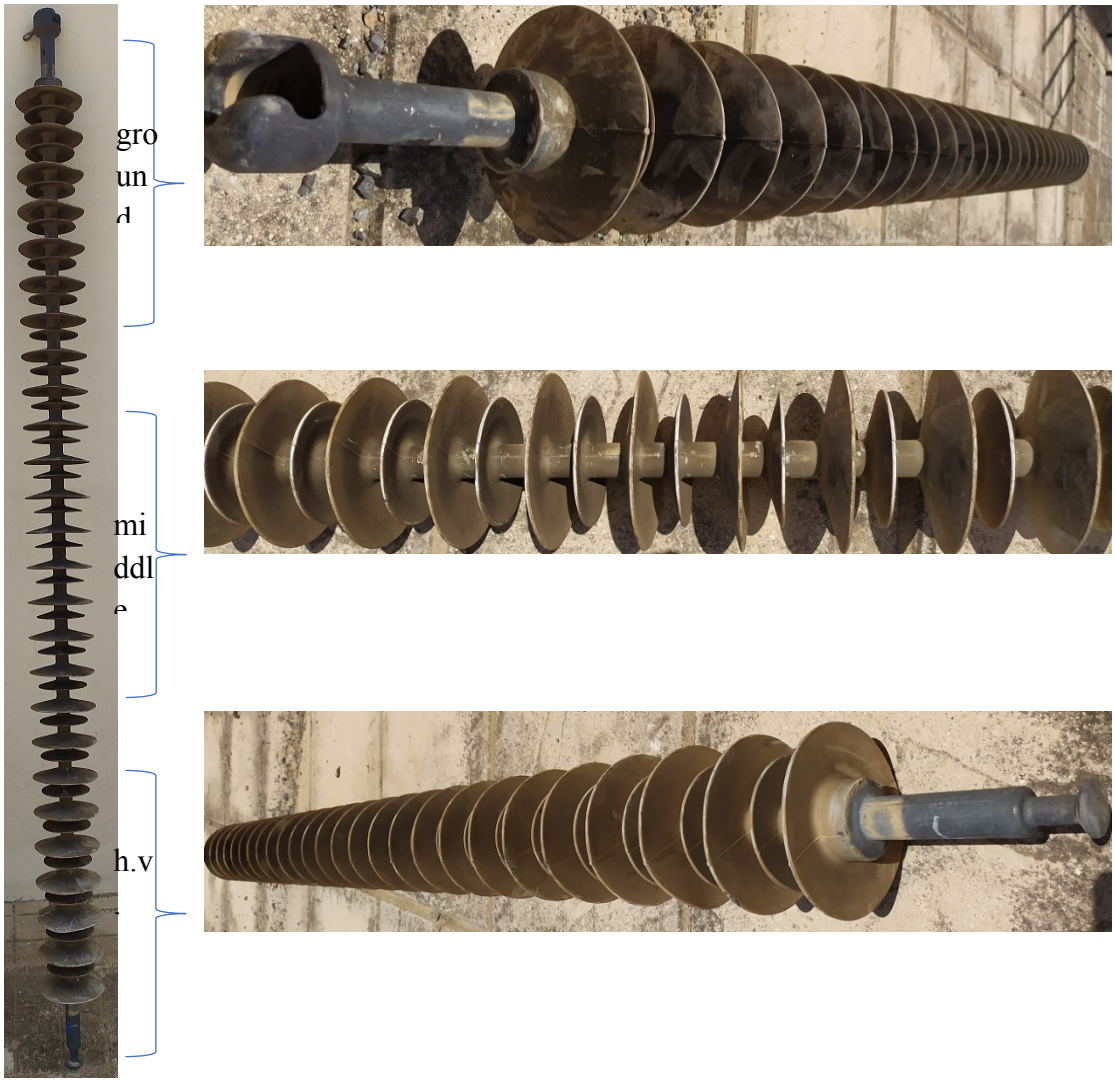
Ίχνη καύσης, ασθενούς έντασης, εντοπίζονται κατά μήκος του πολυμερικού περιβλήματος.



Σχήμα 4.16. Μονωτήρας P7 – Οπτική Επιθεώρηση

4.3.1.8 Μονωτήρας P8

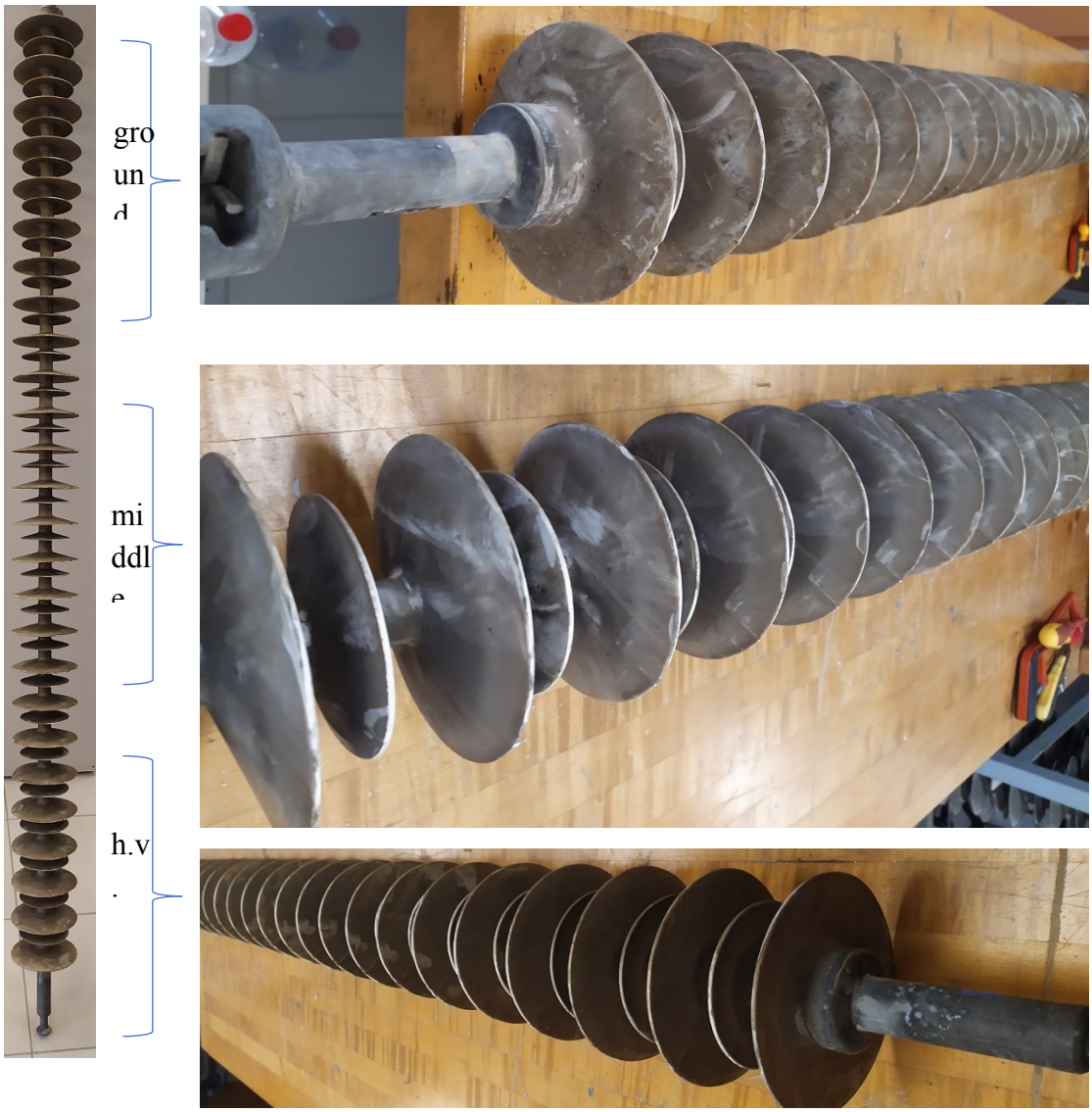
Ίχνη καύσης, ισχυρής έντασης, εντοπίζονται στα πτερύγια πλησίον του ακροδέκτη γείωσης, τόσο στην άνω επιφάνεια τους (top surface) όσο και στην κάτω (bottom surface).



Σχήμα 4.17. Μονωτήρας P8 – Οπτική Επιθεώρηση

4.3.1.9 Μονωτήρας P9

Ίχνη καύσης, ελαφριάς έντασης, εντοπίζονται στο πολυμερικό περίβλημα του μονωτήρα.



Σχήμα 4.18. Μονωτήρας P9 – Οπτική Επιθεώρηση

4.3.1.10 Μονωτήρας P10

Δε εντοπίζονται ίχνη καύσης εντοπίζονται στο πολυμερικό περίβλημα, παρά μόνο ρύπανση.



Σχήμα 4.19. Μονωτήρας P10 – Οπτική Επιθεώρηση

4.3.1.11 Μονωτήρας P11

Δεν παρουσιάζονται ίχνη καύσης στο πολυμερικό περίβλημα, παρά μόνο ρύπανση.



Σχήμα 4.20. Μονωτήρας P11 – Οπτική Επιθεώρηση

4.3.1.12 Μονωτήρας P12

Δεν εντοπίζονται ίχνη καύσης στο πολυμερικό περίβλημα, παρά μόνο ρύπανση.



Σχήμα 4.21. Μονωτήρας P12 – Οπτική Επιθεώρηση

4.3.1.13 Μονωτήρας P13

Ίχνη καύσης, ισχυρής έντασης, εντοπίζονται σε όλο το πολυμερικό περίβλημα του μονωτήρα.



Σχήμα 4.22. Μονωτήρας P13 – Οπτική Επιθεώρηση

4.3.1.14 Μονωτήρας P14

Ίχνη καύσης, ισχυρής έντασης, εντοπίζονται κυρίως στα πτερύγια του πολυμερικού περιβλήματος πλησίον του ακροδέκτη γείωσης.



Σχήμα 4.23. Μονωτήρας P14 – Οπτική Επιθεώρηση

4.3.1.15Μονωτήρας P15

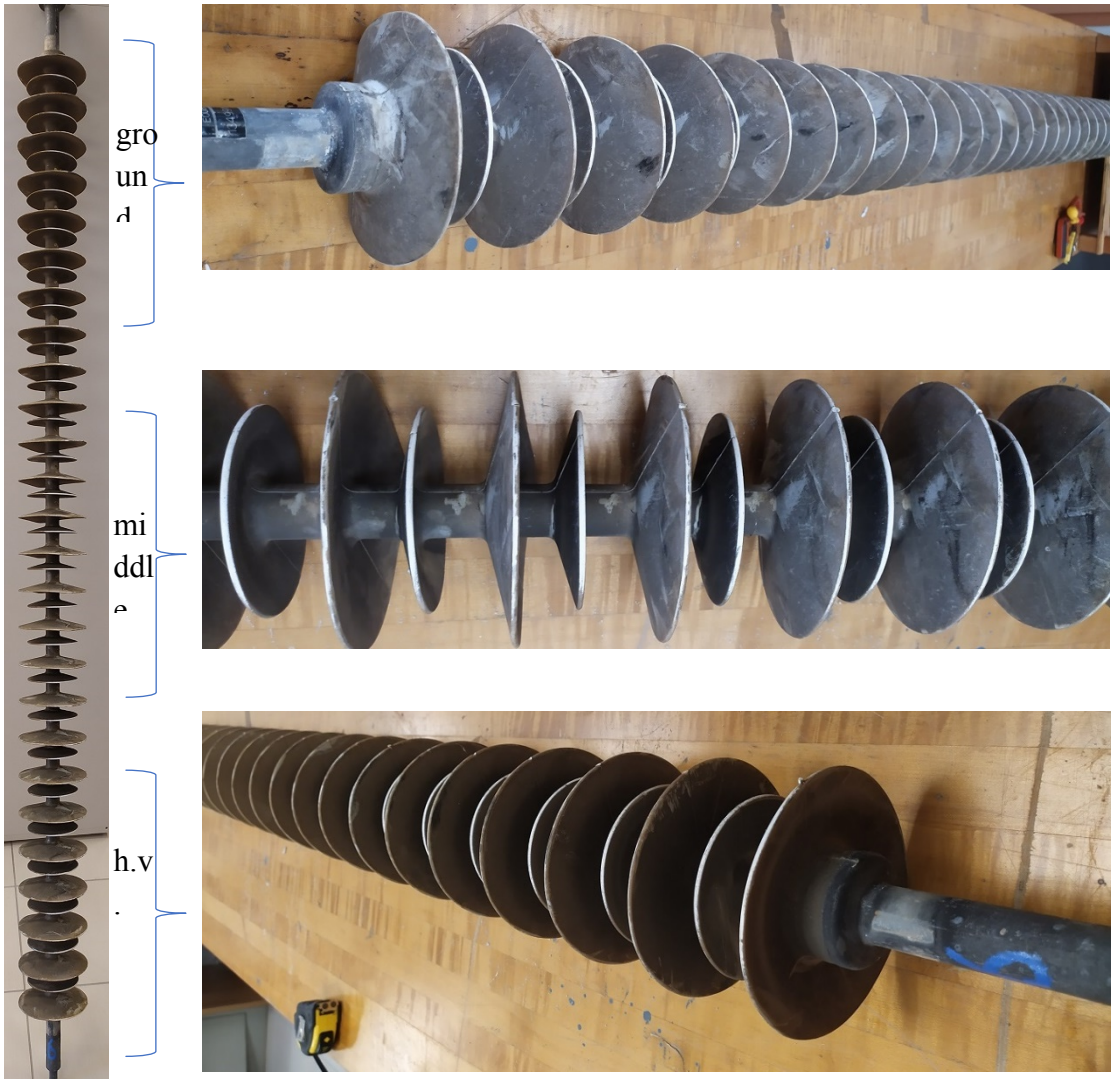
Ίχνη καύσης, ισχυρής έντασης, εντοπίζονται σε όλο το πολυμερικό περίβλημα του μονωτήρα.



Σχήμα 4.24. Μονωτήρας P15 – Οπτική Επιθεώρηση

4.3.1.16 Μονωτήρας P16

Ίχνη καύσης, ελαφριάς έντασης, εντοπίζονται κυρίως στα πτερύγια του πολυμερικού περιβλήματος πλησίον του ακροδέκτη υψηλής τάσης στην κάτω επιφάνεια τους (bottom surface).



Σχήμα 4.25. Μονωτήρας P16 – Οπτική Επιθεώρηση

4.3.1.17 Μονωτήρας P17

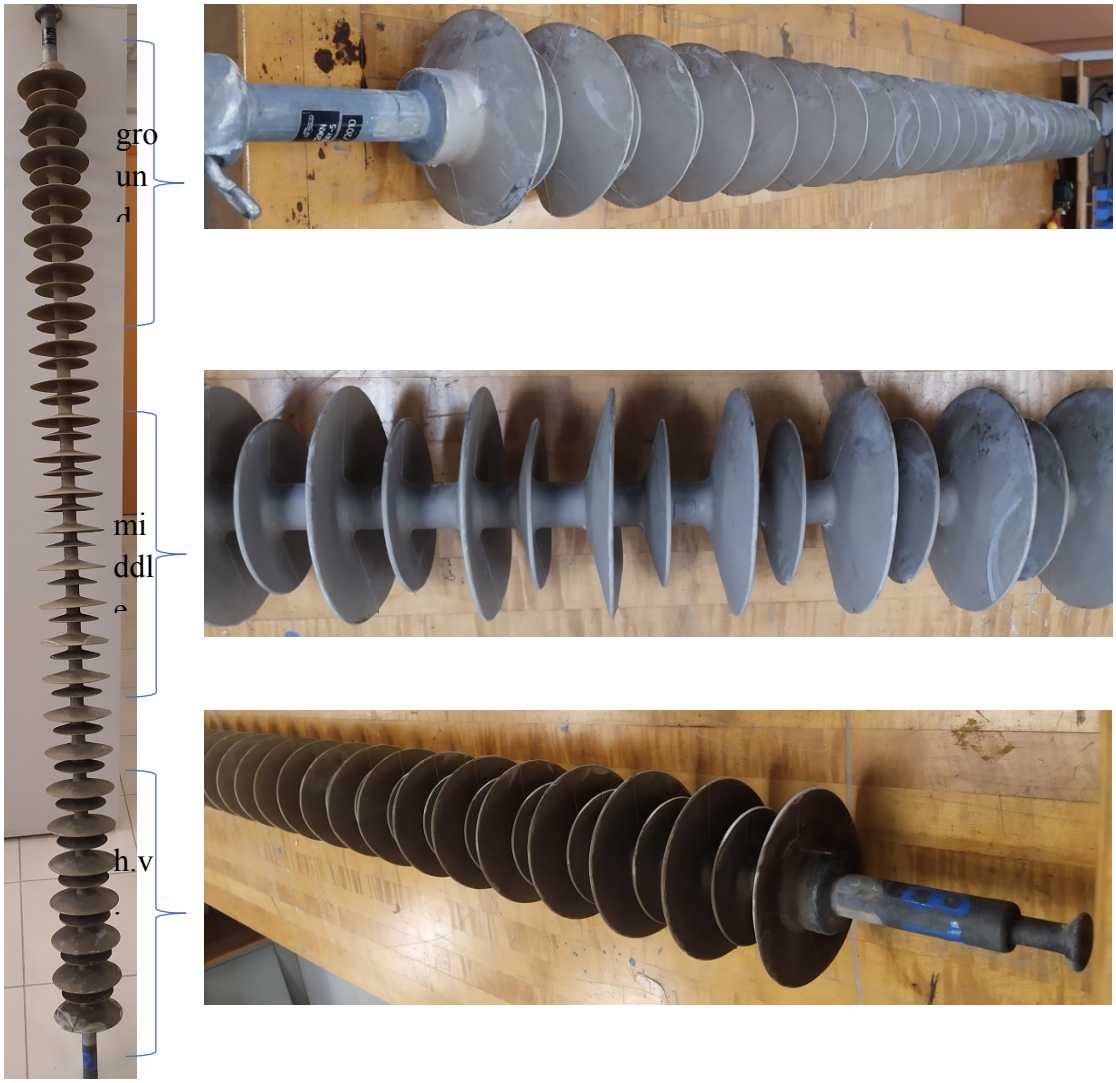
Ίχνη καύσης, ελαφριάς έντασης, εντοπίζονται κυρίως στα πτερύγια του πολυμερικού περιβλήματος πλησίον του ακροδέκτη υψηλής τάσης στην κάτω επιφάνεια τους (bottom surface).



Σχήμα 4.26. Μονωτήρας P17 – Οπτική Επιθεώρηση ok

4.3.1.18 Μονωτήρας P18

Ίχνη καύσης, ελαφριάς έντασης, εντοπίζονται κυρίως στα πτερύγια του πολυμερικού περιβλήματος πλησίον του ακροδέκτη υψηλής τάσης στην κάτω επιφάνεια τους (bottom surface).



Σχήμα 4.27. Μονωτήρας P18 – Οπτική Επιθεώρηση

4.3.1.19Συζήτηση– Οπτική επιθεώρηση

Συμπερασματικά, η οπτική επιθεώρηση δείχνει ότι οι μορφολογικές αλλοιώσεις του μονωτήρα δεν είναι κρίσιμες όσον αφορά την κατάσταση λειτουργίας του μονωτήρα καθώς το πολυμερικό περίβλημα δεν έχει υποστεί διάτρηση. Οι όποιες αλλοιώσεις παρατηρούνται, περιορίζονται κυρίως στο υλικό επιφανείας του πολυμερικού περιβλήματος και σχετίζονται με ίχνη καύσης. Χαρακτηριστικό γνώρισμα των περιοχών του πολυμερικού περιβλήματος που είχαν υποστεί καύση είναι παρουσία πούδρας ως προϊόν της καύσης του πολυμερούς. Παρατηρήθηκε αύξηση της επιφανειακής τραχύτητας στις συγκεκριμένες περιοχές. Παρόμοια ευρήματα καύσης στο υλικό επιφανείας του πολυμερικού περιβλήματος μονωτήρα σιλικόνης λόγω ανάπτυξης ηλεκτρικού τόξου περιγράφονται στην εργασία [8].

Στον ακόλουθο πίνακα συνοψίζονται τα αποτελέσματα της οπτικής επιθεώρησης ανά περιοχή του πολυμερικού περιβλήματος για κάθε μονωτήρα.

Πίνακας 4.3 Αποτελέσματα οπτικής επιθεώρησης

Μονωτήρας	**Ground area**		**Middle area**		**HV area**	
	Top surface	**Bottom surface**	**Top surface**	**Bottom surface**	**Top surface**	**Bottom surface**
P1	0	0	0	0	2	2
P2	0	0	0	0	0	0
P3	1	1	1	1	1	1
P4	2	2	2	2	2	2
P5	0	0	0	0	0	0
P6	2	1	0	0	0	0
P7	1	1	1	1	1	1
P8	3	3	2	2	1	1
P9	1	1	1	1	1	1
P10	0	0	0	0	0	0
P11	0	0	0	0	0	0
P12	0	0	0	0	0	0
P13	3	3	3	3	3	3
P14	3	2	1	1	1	1
P15	3	3	3	3	3	3
P16	0	0	0	0	1	1
P17	0	0	0	0	1	1
P18	0	0	0	0	1	1
Υπόμνημα: 0 μη εμφανής αλλοίωση, 1 ίχνη καύσης ασθενούς έντασης, 2 ίχνη καύσης μέτριας έντασης, 3 ίχνη καύσης ισχυρής έντασης						

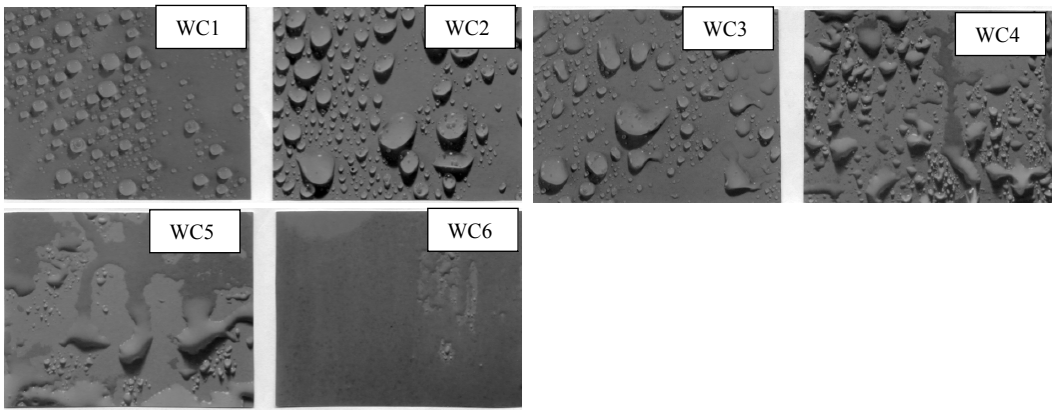
Η οπτική επιθεώρηση έδειξε ότι οι μονωτήρες που έχουν υποστεί μεγαλύτερη φθορά στο πολυμερικό περίβλημα τους λόγω της θερμικής καταπόνησης του από την δασική πυρκαγιά, είναι οι μονωτήρες P8, P13 και P15.

4.3.2 Διαβάθμιση διαβροχής

Προκειμένου να αξιολογηθούν οι επιπτώσεις της δασικής πυρκαγιάς στην υδρόφοβη συμπεριφορά του πολυμερικού περιβλήματός του, διεξήχθησαν μετρήσεις διαβροχής σύμφωνα με την τεχνική οδηγία IEC 62073 [7]. Για το σκοπό αυτό, εφαρμόστηκαν η μέθοδος ψεκασμού και η μέθοδος γωνίας επαφής κατά μήκος του πολυμερικού περιβλήματος του μονωτήρα.

4.3.2.1 Μέθοδος του ψεκασμού

Το πολυμερικό περίβλημα του μονωτήρα ψεκάστηκε με νέφος απιονισμένου νερού από απόσταση περίπου 25 cm. Η αξιολόγηση της διαβροχής διαρκεί περίπου 25 δευτερόλεπτα αμέσως μετά το τέλος του ψεκασμού του μονωτήρα. Η διαβροχή της επιφάνειας του πολυμερικού περιβλήματος που έχει υποστεί ψεκασμό αξιολογείται βάσει του σχηματισμού σταγόνων νερού ή υμενίου (φιλμ) νερού. Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 62073 [7] η διαβροχή της επιφάνειας ενός μονωτήρα μπορεί να διαβαθμιστεί από την κλάση WC1 (Σχήμα 4.28), που αντιστοιχεί σε υπερβολικά υδρόφοβη συμπεριφορά έως την κλάση WC7, που αντιστοιχεί σε υπερβολικά υδρόφιλη συμπεριφορά.



Σχήμα 4.28. Κλάσεις διαβροχής σύμφωνα με IEC 62073 [7].

4.3.2.1.1 Μονωτήρας P1

Περιοχή	Εικόνα		Κλάση Διαβροχής (WC) top/ bottom surface
	Top surface	Bottom surface	
ground			WC2/WC2
middle			WC2/WC2
h.v.			WC3/WC2

4.3.2.1.2 Μονωτήρας P2

Περιοχή	Εικόνα		Κλάση Διαβροχής (WC) top/ bottom surface
	Top surface	Bottom surface	
ground			WC2/WC2
middle			WC2/WC2
h.v.			WC2/WC2

4.3.2.1.3 Μονωτήρας P3

Περιοχή	Εικόνα		Κλάση Διαβροχής (WC) top/ bottom surface
	Top surface	Bottom surface	
ground			WC2/WC2
middle			WC3/WC3
h.v.			WC2/WC2

4.3.2.1.4 Μονωτήρας P4

Περιοχή	Εικόνα		Κλάση Διαβροχής (WC) top/ bottom surface
	Top surface	Bottom surface	
ground			WC3/WC3
middle			WC3/WC3
h.v.			WC3/WC3

4.3.2.1.5 Μονωτήρας P5

Περιοχή	Εικόνα		Κλάση Διαβροχής (WC) top/ bottom surface
	Top surface	Bottom surface	
ground			WC2/WC2
middle			WC2/WC2
h.v.			WC2/WC2

4.3.2.1.6 Μονωτήρας P6

Περιοχή	Εικόνα		Κλάση Διαβροχής (WC) top/ bottom surface
	Top surface	Bottom surface	
ground			WC3/WC2
middle			WC2/WC2
h.v.			WC2/WC2

4.3.2.1.7 Μονωτήρας P7

Περιοχή	Εικόνα		Κλάση Διαβροχής (WC) top/ bottom surface
	Top surface	Bottom surface	
ground			WC2/WC2
middle			WC3/WC2
h.v.			WC2/WC2

4.3.2.1.8 Μονωτήρας P8

Περιοχή	Εικόνα		Κλάση Διαβροχής (WC) top/ bottom surface
	Top surface	Bottom surface	
ground			WC4/WC4
middle			WC3/WC3
h.v.			WC3/WC3

4.3.2.1.9 Μονωτήρας P9

Περιοχή	Εικόνα		Κλάση Διαβροχής (WC) top/ bottom surface
	Top surface	Bottom surface	
ground			WC3/WC3
middle			WC3/WC3
h.v.			WC3/WC3

4.3.2.1.10 Μονωτήρας P10

Περιοχή	Εικόνα		Κλάση Διαβροχής (WC) top/ bottom surface
	Top surface	Bottom surface	
ground			WC2/WC2
middle			WC2/WC2
h.v.			WC2/WC2

4.3.2.1.11 Μονωτήρας P11

Περιοχή	Εικόνα		Κλάση Διαβροχής (WC) top/ bottom surface
	Top surface	Bottom surface	
ground			WC2/WC1
middle			WC2/WC1
h.v.			WC2/WC1

4.3.2.1.12 Μονωτήρας P12

Περιοχή	Εικόνα		Κλάση Διαβροχής (WC) top/ bottom surface
	Top surface	Bottom surface	
ground			WC2/WC2
middle			WC2/WC2
h.v.			WC2/WC2

4.3.2.1.13 Μονωτήρας P13

Περιοχή	Εικόνα		Κλάση Διαβροχής (WC) top/ bottom surface
	Top surface	Bottom surface	
ground			WC4/WC3
middle			WC4/WC3
h.v.			WC4/WC3

4.3.2.1.14 Μονωτήρας P14

Περιοχή	Εικόνα		Κλάση Διαβροχής (WC) top/ bottom surface
	Top surface	Bottom surface	
ground			WC4/WC2
middle			WC3/WC2
h.v.			WC3/WC2

4.3.2.1.15 Μονωτήρας P15

Περιοχή	Εικόνα		Κλάση Διαβροχής (WC) top/ bottom surface
	Top surface	Bottom surface	
ground			WC4/WC3
middle			WC3/WC3
h.v.			WC4/WC3

4.3.2.1.16 Μονωτήρας P16

Περιοχή	Εικόνα		Κλάση Διαβροχής (WC) top/ bottom surface
	Top surface	Bottom surface	
ground			WC2/WC2
middle			WC3/WC2
h.v.			WC3/WC2

4.3.2.1.17 Μονωτήρας P17

Περιοχή	Εικόνα		Κλάση Διαβροχής (WC) top/ bottom surface
	Top surface	Bottom surface	
ground			WC2/WC2
middle			WC2/WC2
h.v.			WC2/WC2

4.3.2.1.18 Μονωτήρας P18

Περιοχή	Εικόνα		Κλάση Διαβροχής (WC) top/ bottom surface
	Top surface	Bottom surface	
ground			WC1/WC1
middle			WC2/WC1
h.v.			WC2/WC2

4.3.2.1.19 Συζήτηση – Διαβάθμιση διαβροχής με μέθοδο ψεκασμού

Τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις διαβροχής με την μέθοδο του ψεκασμού δείχνουν ότι το πολυμερικό περίβλημα των μονωτήρων που είχε καταπονηθεί θερμικά εξ' αιτίας της δασικής πυρκαγιάς διατηρεί την υδροφοβία του. Οι μονωτήρες που είχαν ίχνη καύσης ισχυρής έντασης (P8, P13 και P15) ήταν λιγότερο υδρόφοβοι (WC4) σε σχέση με αυτούς που δεν είχαν.

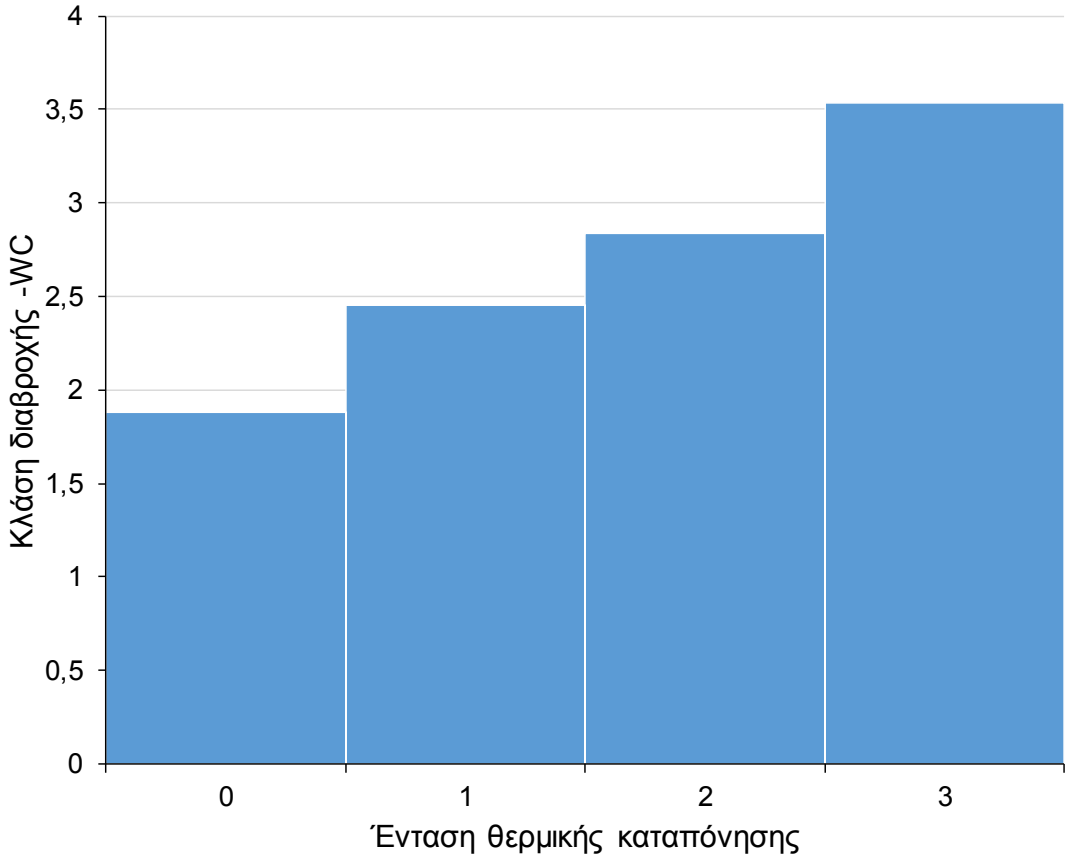
Στον ακόλουθο πίνακα συνοψίζονται τα αποτελέσματα της οπτικής επιθεώρησης και της κατάστασης διαβροχής, όπως η τελευταία προκύπτει από τις μετρήσεις διαβροχής με την μέθοδο του ψεκασμού, ανά περιοχή του πολυμερικού περιβλήματος για κάθε μονωτήρα.

Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα οπτικής επιθεώρησης/ Διαβάθμιση διαβροχής (Spray method)

Μονωτήρας	**Ground area**		**Middle area**		**HV area**	
	Top surface	**Bottom surface**	**Top surface**	**Bottom surface**	**Top surface**	**Bottom surface**
P1	0/ WC2	0/ WC2	0/ WC2	0/ WC2	2/ WC3	2/ WC2
P2	0/ WC2	0/ WC2	0/ WC2	0/ WC2	0/ WC2	0/ WC2
P3	1/ WC2	1/ WC2	1/ WC3	1/ WC3	1/ WC2	1/ WC2
P4	2/ WC3	2/ WC3	2/ WC3	2/ WC3	2/ WC3	2/ WC3
P5	0/ WC2	0/ WC2	0/ WC2	0/ WC2	0/ WC2	0/ WC2
P6	2/ WC3	1/ WC2	0/ WC2	0/ WC2	0/ WC2	0/ WC2
P7	1/ WC2	1/ WC2	1/ WC3	1/ WC2	1/ WC2	1/ WC2
P8	3/ WC4	3/ WC4	2/ WC3	2/ WC3	1/ WC3	1/ WC3
P9	1/ WC3	1/ WC3	1/ WC3	1/ WC3	1/ WC3	1/ WC3
P10	0/ WC2	0/ WC2	0/ WC2	0/ WC2	0/ WC2	0/ WC2
P11	0/ WC2	0/ WC1	0/ WC2	0/ WC1	0/ WC2	0/ WC1
P12	0/ WC2	0/ WC2	0/ WC2	0/ WC2	0/ WC2	0/ WC2
P13	3/ WC4	3/ WC3	3/ WC4	3/ WC3	3/ WC4	3/ WC3
P14	3/ WC4	2/ WC2	1/ WC3	1/ WC2	1/ WC3	1/ WC2
P15	3/ WC4	3/ WC3	3/ WC3	3/ WC3	3/ WC4	3/ WC3
P16	0/ WC2	0/ WC2	0/ WC2	0/ WC2	1/ WC3	1/ WC2
P17	0/ WC2	0/ WC2	0/ WC2	0/ WC2	1/ WC2	1/ WC2
P18	0/ WC1	0/ WC1	0/ WC2	0/ WC1	1/ WC2	1/ WC2

Υπόμνημα: 0 μη εμφανής αλλοίωση, 1 ίχνη καύσης ασθενούς έντασης, 2 ίχνη καύσης μέτριας έντασης, 3 ίχνη καύσης ισχυρής έντασης

Από τα δεδομένα του Πίνακα 4.4, υπολογίζεται η μέση κλάση διαβροχής για κάθε βαθμίδα θερμικής καταπόνησης και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.29.



Σχήμα 4.29. Κλάση διαβροχής επιφάνειας συναρτήσει της έντασης θερμικής καταπόνησης

Είναι εμφανές ότι οι μονωτήρες που έφεραν ίχνη καύσης λόγω ισχυρότερης θερμικής καταπόνησης ήταν λιγότερο υδρόφοβοι. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι συμβαίνουν μεταβολές στην σύνθεση του πολυμερικού περιβλήματος των μονωτήρων λόγω της θερμικής καταπόνησης που έχουν ως αποτέλεσμα την εξασθένιση της υδρόφοβης συμπεριφοράς των μονωτήρων. Εξασθένιση ή και απώλεια της υδροφοβίας του πολυμερικού περιβλήματος μονωτήρων σιλικόνης λόγω διάφορων παραγόντων καταπόνησης, συμπεριλαμβανομένης και της θερμικής καταπόνησης προερχόμενης από ανάπτυξη επιφανειακών μερικών εκκενώσεων, έχει καταγραφεί στις εργασίες [9]–[19] .

4.3.2.2 Μέθοδος της γωνίας επαφής

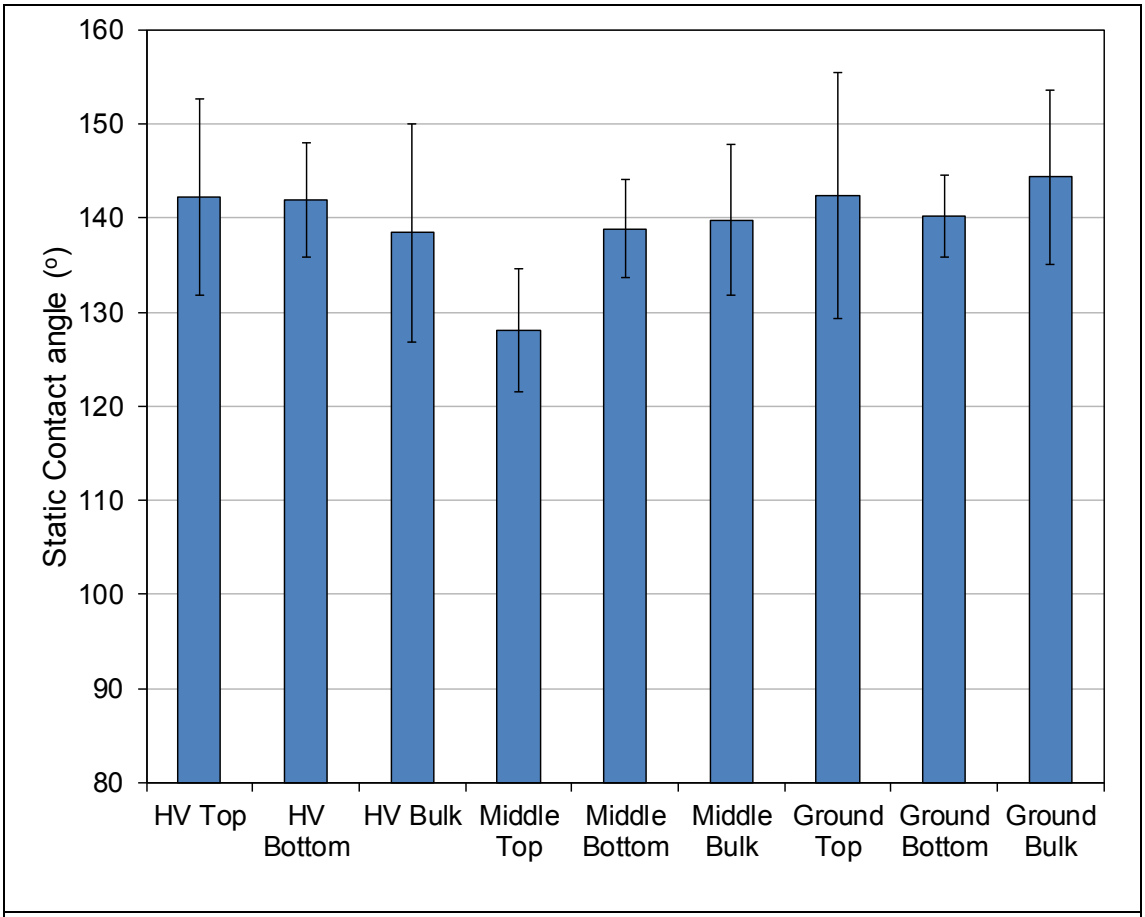
Οι μετρήσεις της γωνίας επαφής διεξήχθησαν με την βοήθεια του γωνιόμετρου KSV CAM 101 στο υλικό επιφανείας δεκαπέντε (15) δειγμάτων που ελήφθησαν κατά μήκος του πολυμερικού περιβλήματος. Εξ' αυτών τα πέντε (5) δείγματα προέρχονταν από τα πτερύγια πλησίον της γείωσης (ground), πέντε (δείγματα) από πτερύγια στην μεσαία περιοχή του πολυμερικού περιβλήματος (middle) και τα υπόλοιπα από πτερύγια πλησίον της υψηλής τάσης (h.v.). Για κάθε δείγμα μετρήσεις διεξήχθησαν στο εσωτερικό υλικό του πολυμερικού περιβλήματος καθώς και στην άνω (top) και κάτω (bottom) επιφάνεια του. Οι μετρήσεις της στατικής γωνίας επαφής διεξήχθησαν με την εναπόθεση σταγόνων νερού (~10 μl) στην επιφάνεια των δειγμάτων εφαρμόζοντας την μέθοδο της επικαθήμενης σταγόνας [20], [21].

Στατική γωνία επαφής μεγαλύτερη ή ίση των 90^o δηλώνει υδρόφοβη συμπεριφορά της επιφάνειας, ενώ γωνία μικρότερη των 90^o υδρόφιλη. Όσο μεγαλύτερη είναι η στατική γωνία επαφής τόσο πιο υδρόφοβη είναι η επιφάνεια. Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μετρήσεις τις στατικής γωνίας επαφής που διεξήχθησαν σε δείγματα που ελήφθησαν κατά μήκος του πολυμερικού περιβλήματος των μονωτήρων.

Στις ακόλουθες υποενότητες παρουσιάζονται οι μετρήσεις της στατικής γωνίας επαφής ανά μονωτήρα.

4.3.2.2.1 Μονωτήρας P1

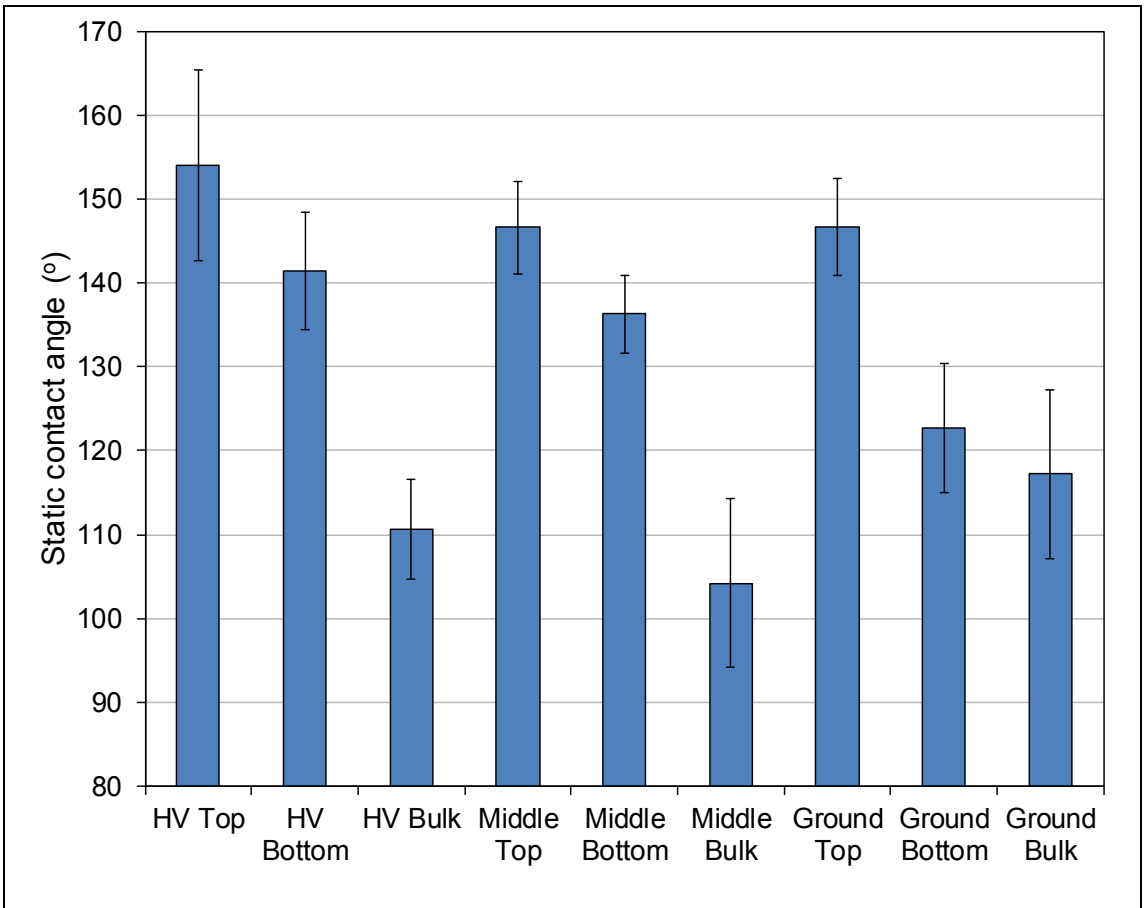
Μονωτήρας	Τμήμα	Πλευρά	θαν(°)	stdev (°)
P1	HV	HV Top	142,27	10,42
P1	HV	HV Bottom	141,94	6,06
P1	HV	HV Bulk	138,40	11,65
P1	Middle	Middle Top	128,08	6,52
P1	Middle	Middle Bottom	138,83	5,24
P1	Middle	Middle Bulk	139,78	8,03
P1	ground	Ground Top	142,37	12,99
P1	ground	Ground Bottom	140,23	4,36
P1	ground	Ground Bulk	144,38	9,25



Σχήμα 4.30. Στατική γωνία επαφής στην άνω, κάτω επιφάνεια των πτερυγίων καθώς και στο εσωτερικό υλικό τους κατά μήκος του μονωτήρα P1.

4.3.2.2.2 Μονωτήρας P2

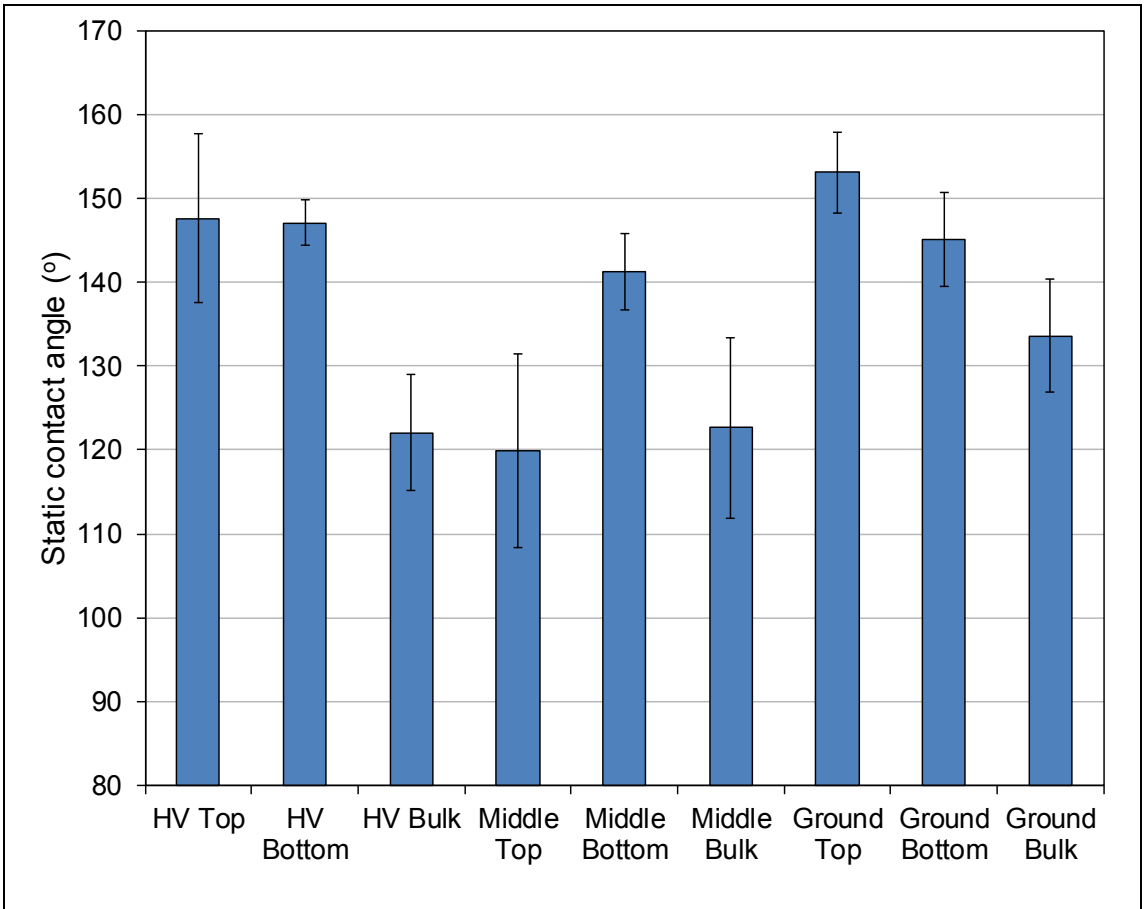
Μονωτήρας	Τμήμα	Πλευρά	θαν(ο)	stdev (ο)
P2	HV	HV Top	154,05	11,36
P2	HV	HV Bottom	141,42	6,96
P2	HV	HV Bulk	110,58	5,99
P2	Middle	Middle Top	146,57	5,52
P2	Middle	Middle Bottom	136,30	4,62
P2	Middle	Middle Bulk	104,20	10,10
P2	ground	Ground Top	146,61	5,78
P2	ground	Ground Bottom	122,72	7,64
P2	ground	Ground Bulk	117,19	10,06



Σχήμα 4.31. Στατική γωνία επαφής στην άνω, κάτω επιφάνεια των πτερυγίων καθώς και στο εσωτερικό υλικό τους κατά μήκος του μονωτήρα P2.

4.3.2.2.3 Μονωτήρας P3

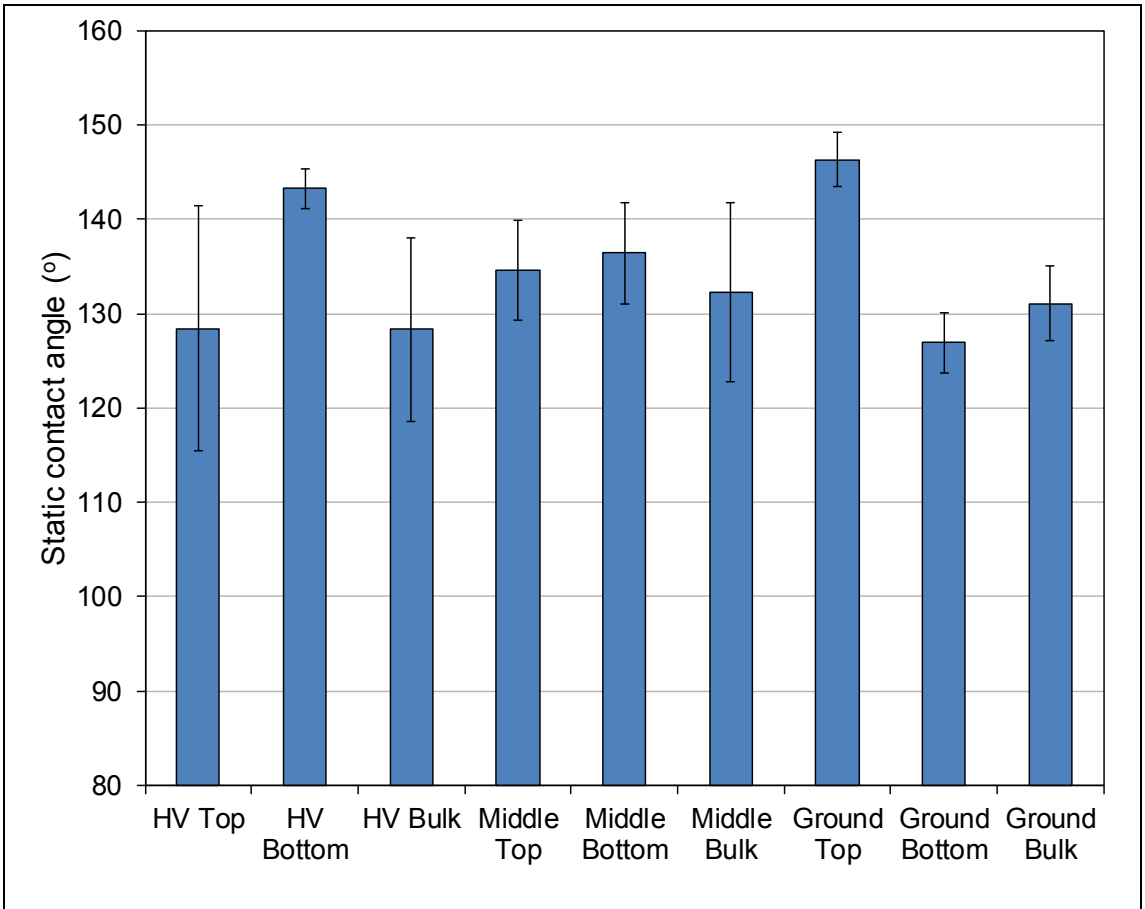
Μονωτήρας	Τμήμα	Επιφάνεια	θαν(ο)	stdev (ο)
P3	HV	HV Top	147,60	10,10
P3	HV	HV Bottom	147,08	2,66
P3	HV	HV Bulk	122,06	6,94
P3	Middle	Middle Top	119,91	11,56
P3	Middle	Middle Bottom	141,31	4,54
P3	Middle	Middle Bulk	122,66	10,77
P3	ground	Ground Top	153,07	4,79
P3	ground	Ground Bottom	145,04	5,62
P3	ground	Ground Bulk	133,60	6,69



Σχήμα 4.32. Στατική γωνία επαφής στην άνω, κάτω επιφάνεια των πτερυγίων καθώς και στο εσωτερικό υλικό τους κατά μήκος του μονωτήρα P3.

4.3.2.2.4 Μονωτήρας P4

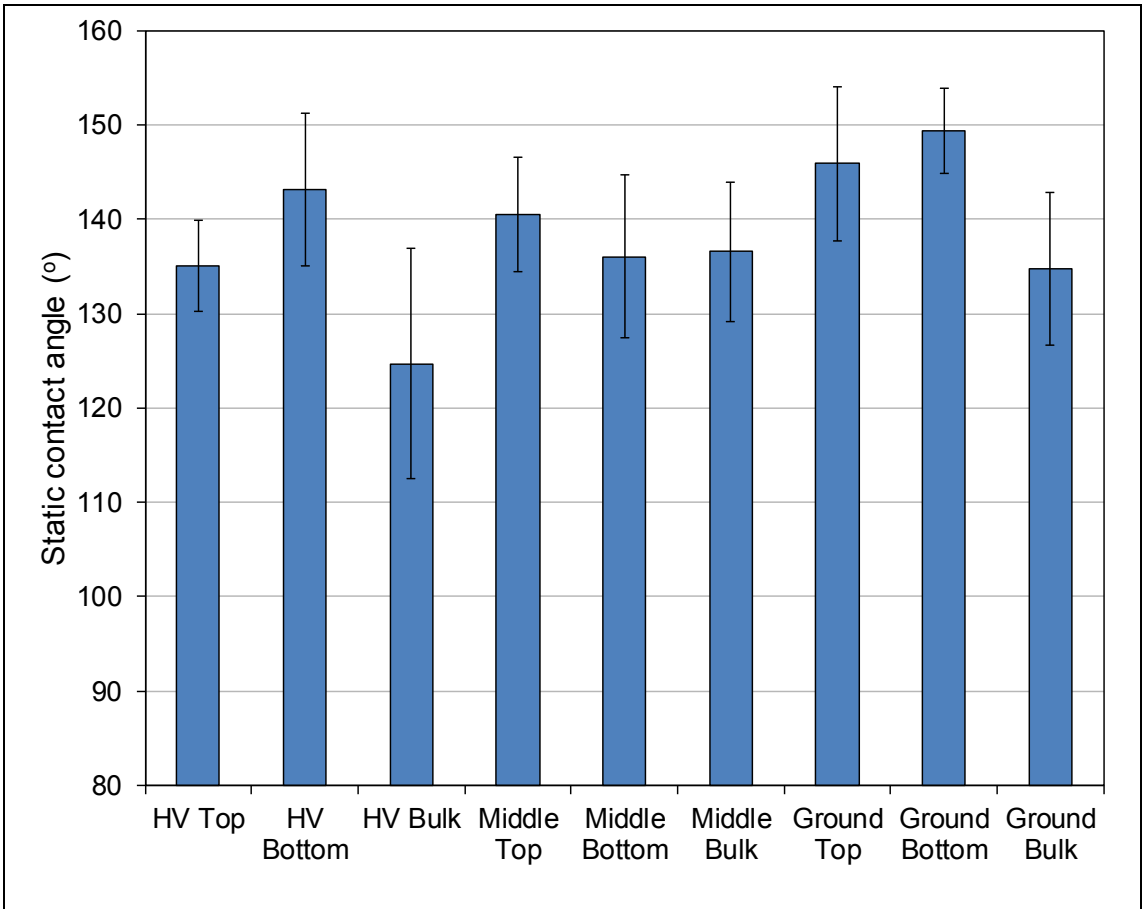
Μονωτήρας	Τμήμα	Πλευρά	θαν(ο)	stdev (ο)
P4	HV	HV Top	128,42	12,99
P4	HV	HV Bottom	143,22	2,12
P4	HV	HV Bulk	128,32	9,75
P4	Middle	Middle Top	134,56	5,32
P4	Middle	Middle Bottom	136,40	5,32
P4	Middle	Middle Bulk	132,27	9,50
P4	ground	Ground Top	146,31	2,87
P4	ground	Ground Bottom	126,89	3,20
P4	ground	Ground Bulk	131,08	3,94



Σχήμα 4.33. Στατική γωνία επαφής στην άνω, κάτω επιφάνεια των πτερυγίων καθώς και στο εσωτερικό υλικό τους κατά μήκος του μονωτήρα P4.

4.3.2.2.5 Μονωτήρας P5

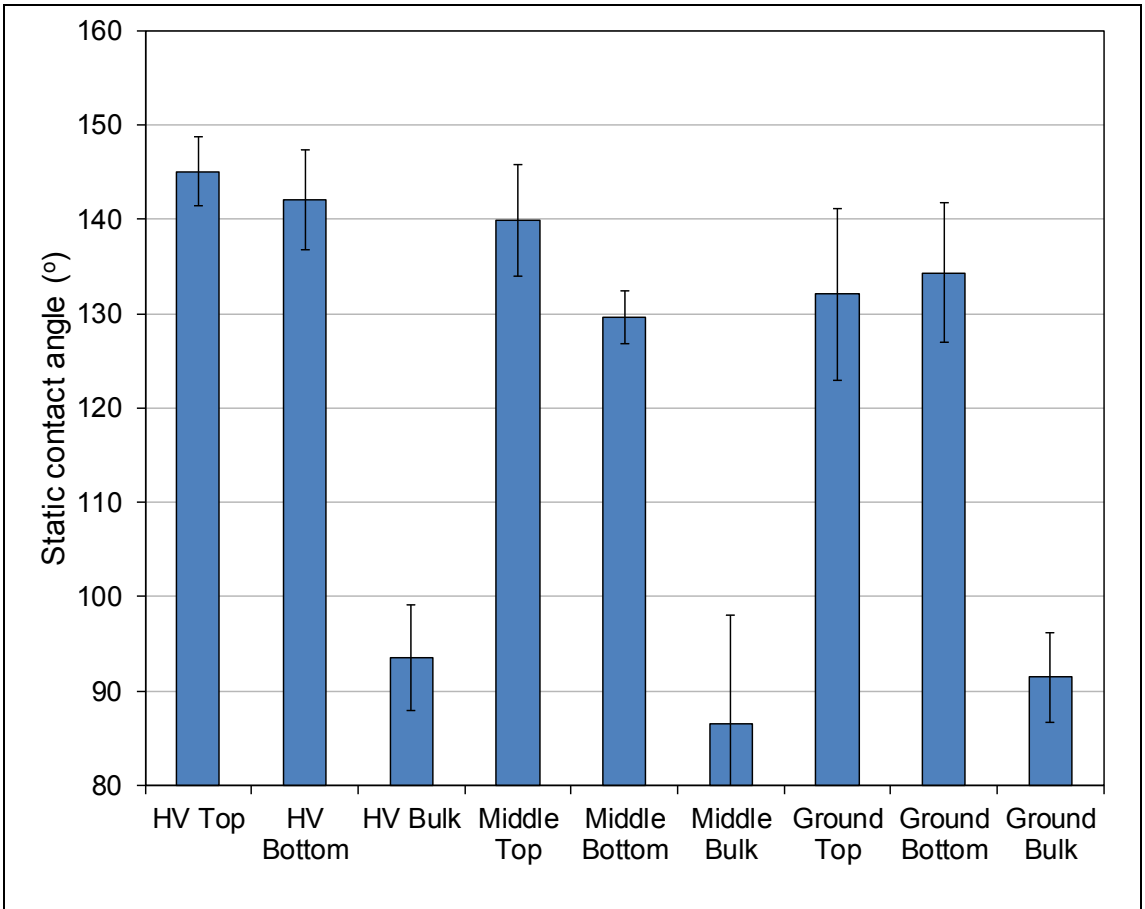
Μονωτήρας	Τμήμα	Πλευρά	θαν(ο)	stdev (ο)
P5	HV	HV Top	134,99	4,82
P5	HV	HV Bottom	143,13	8,03
P5	HV	HV Bulk	124,68	12,25
P5	Middle	Middle Top	140,44	6,08
P5	Middle	Middle Bottom	136,04	8,64
P5	Middle	Middle Bulk	136,58	7,37
P5	ground	Ground Top	145,91	8,19
P5	ground	Ground Bottom	149,32	4,49
P5	ground	Ground Bulk	134,76	8,07



Σχήμα 4.34. Στατική γωνία επαφής στην άνω, κάτω επιφάνεια των πτερυγίων καθώς και στο εσωτερικό υλικό τους κατά μήκος του μονωτήρα P5.

4.3.2.2.6 Μονωτήρας P6

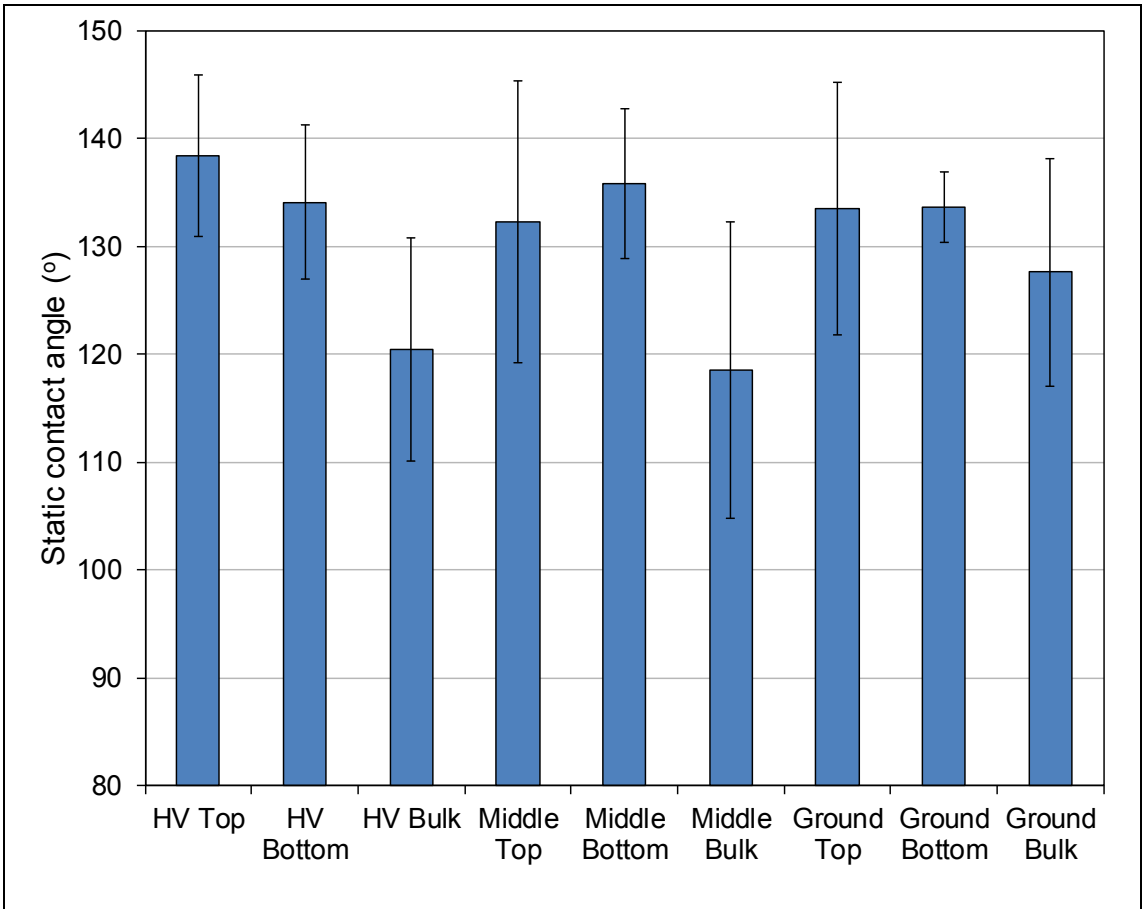
Μονωτήρας	Τμήμα	Πλευρά	θαν(ο)	stdev (ο)
P6	HV	HV Top	145,05	3,62
P6	HV	HV Bottom	142,05	5,36
P6	HV	HV Bulk	93,47	5,59
P6	Middle	Middle Top	139,90	5,93
P6	Middle	Middle Bottom	129,63	2,84
P6	Middle	Middle Bulk	86,51	11,49
P6	ground	Ground Top	132,06	9,12
P6	ground	Ground Bottom	134,35	7,42
P6	ground	Ground Bulk	91,46	4,79



Σχήμα 4.35. Στατική γωνία επαφής στην άνω, κάτω επιφάνεια των πτερυγίων καθώς και στο εσωτερικό υλικό τους κατά μήκος του μονωτήρα P6.

4.3.2.2.7 Μονωτήρας P7

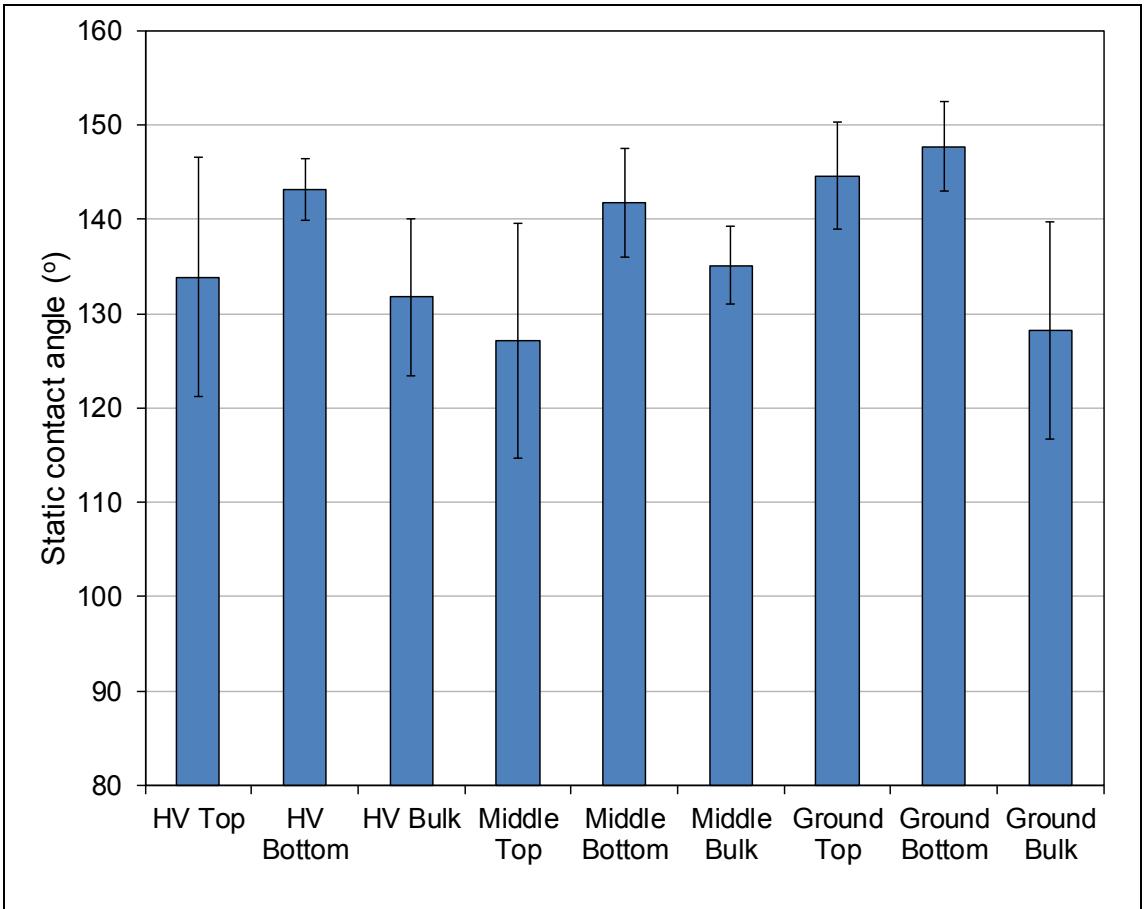
Μονωτήρας	Τμήμα	Πλευρά	θαν(ο)	stdev (ο)
P7	HV	HV Top	138,37	7,42
P7	HV	HV Bottom	134,07	7,12
P7	HV	HV Bulk	120,44	10,32
P7	Middle	Middle Top	132,24	13,04
P7	Middle	Middle Bottom	135,81	6,93
P7	Middle	Middle Bulk	118,52	13,80
P7	ground	Ground Top	133,50	11,68
P7	ground	Ground Bottom	133,60	3,29
P7	ground	Ground Bulk	127,57	10,60



Σχήμα 4.36. Στατική γωνία επαφής στην άνω, κάτω επιφάνεια των πτερυγίων καθώς και στο εσωτερικό υλικό τους κατά μήκος του μονωτήρα P7.

4.3.2.2.8 Μονωτήρας P8

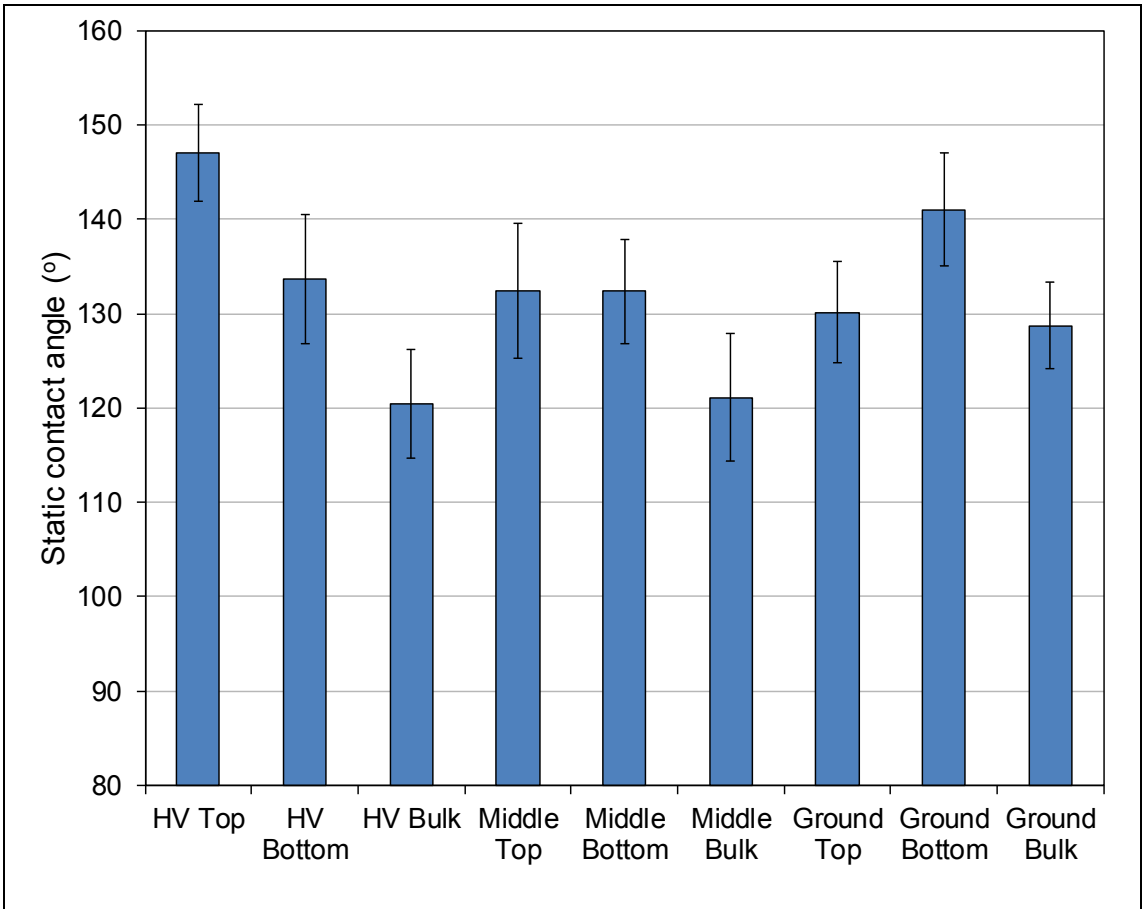
Μονωτήρας	Τμήμα	Πλευρά	θαν(ο)	stdev (ο)
P8	HV	HV Top	133,88	12,61
P8	HV	HV Bottom	143,12	3,25
P8	HV	HV Bulk	131,72	8,27
P8	Middle	Middle Top	127,11	12,47
P8	Middle	Middle Bottom	141,76	5,79
P8	Middle	Middle Bulk	135,13	4,16
P8	ground	Ground Top	144,57	5,68
P8	ground	Ground Bottom	147,68	4,75
P8	ground	Ground Bulk	128,21	11,45



Σχήμα 4.37. Στατική γωνία επαφής στην άνω, κάτω επιφάνεια των πτερυγίων καθώς και στο εσωτερικό υλικό τους κατά μήκος του μονωτήρα P8.

4.3.2.2.9 Μονωτήρας P9

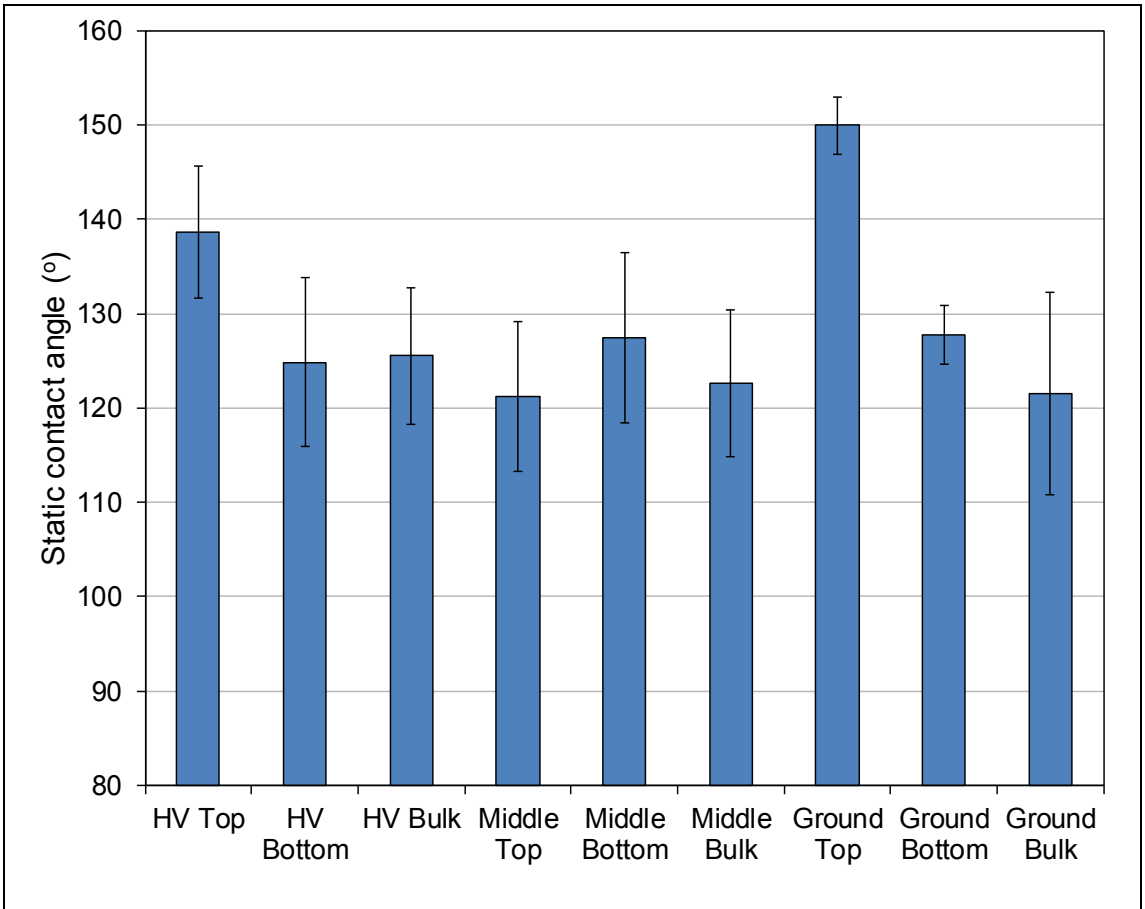
Μονωτήρας	Τμήμα	Πλευρά	θαν(ο)	stdev (ο)
P9	HV	HV Top	147,02	5,10
P9	HV	HV Bottom	133,66	6,80
P9	HV	HV Bulk	120,45	5,69
P9	Middle	Middle Top	132,41	7,08
P9	Middle	Middle Bottom	132,40	5,52
P9	Middle	Middle Bulk	121,12	6,78
P9	ground	Ground Top	130,15	5,43
P9	ground	Ground Bottom	141,04	6,04
P9	ground	Ground Bulk	128,71	4,58



Σχήμα 4.38. Στατική γωνία επαφής στην άνω, κάτω επιφάνεια των πτερυγίων καθώς και στο εσωτερικό υλικό τους κατά μήκος του μονωτήρα P9.

4.3.2.2.10 Μονωτήρας P10

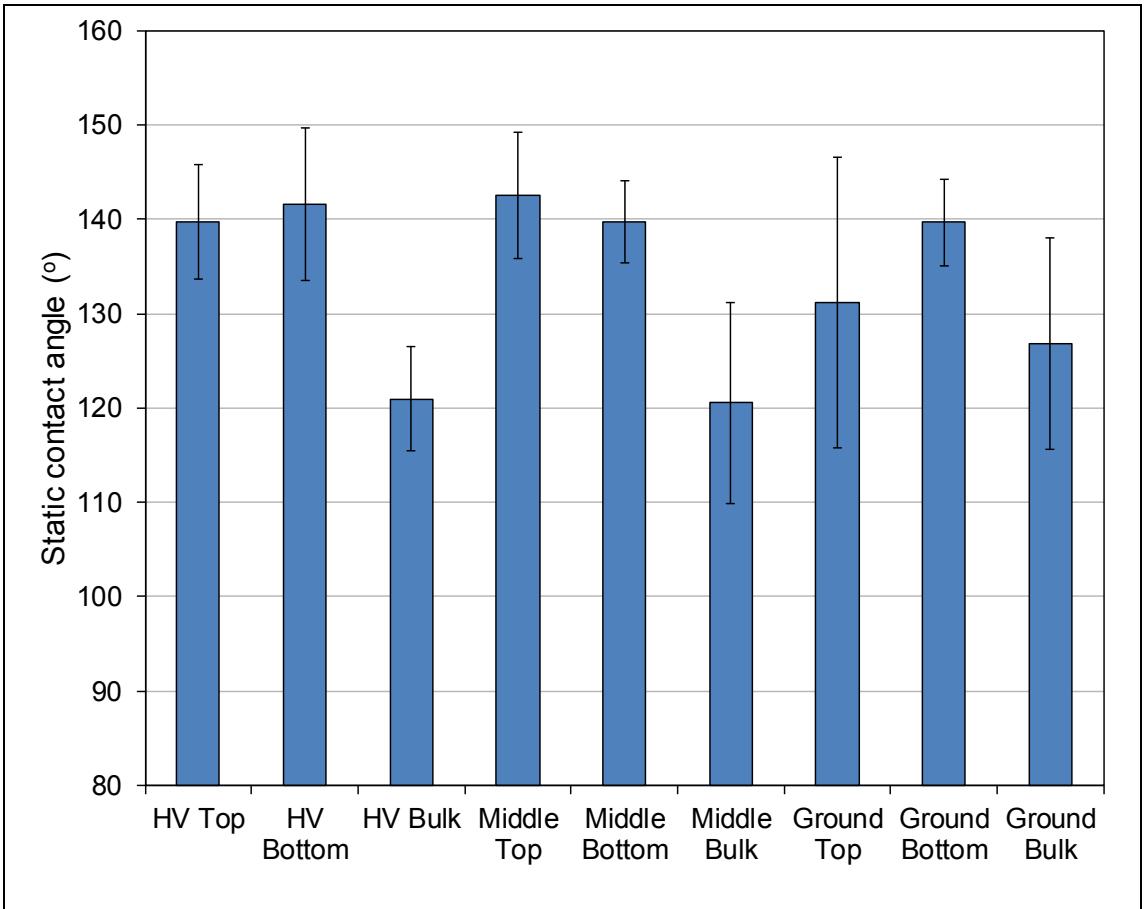
Μονωτήρας	Τμήμα	Πλευρά	θαν(ο)	stdev (ο)
P10	HV	HV Top	138,69	6,99
P10	HV	HV Bottom	124,86	9,00
P10	HV	HV Bulk	125,53	7,22
P10	Middle	Middle Top	121,15	7,94
P10	Middle	Middle Bottom	127,46	9,00
P10	Middle	Middle Bulk	122,62	7,80
P10	ground	Ground Top	149,91	3,09
P10	ground	Ground Bottom	127,78	3,14
P10	ground	Ground Bulk	121,56	10,73



Σχήμα 4.39. Στατική γωνία επαφής στην άνω, κάτω επιφάνεια των πτερυγίων καθώς και στο εσωτερικό υλικό τους κατά μήκος του μονωτήρα P10.

4.3.2.2.11 Μονωτήρας P11

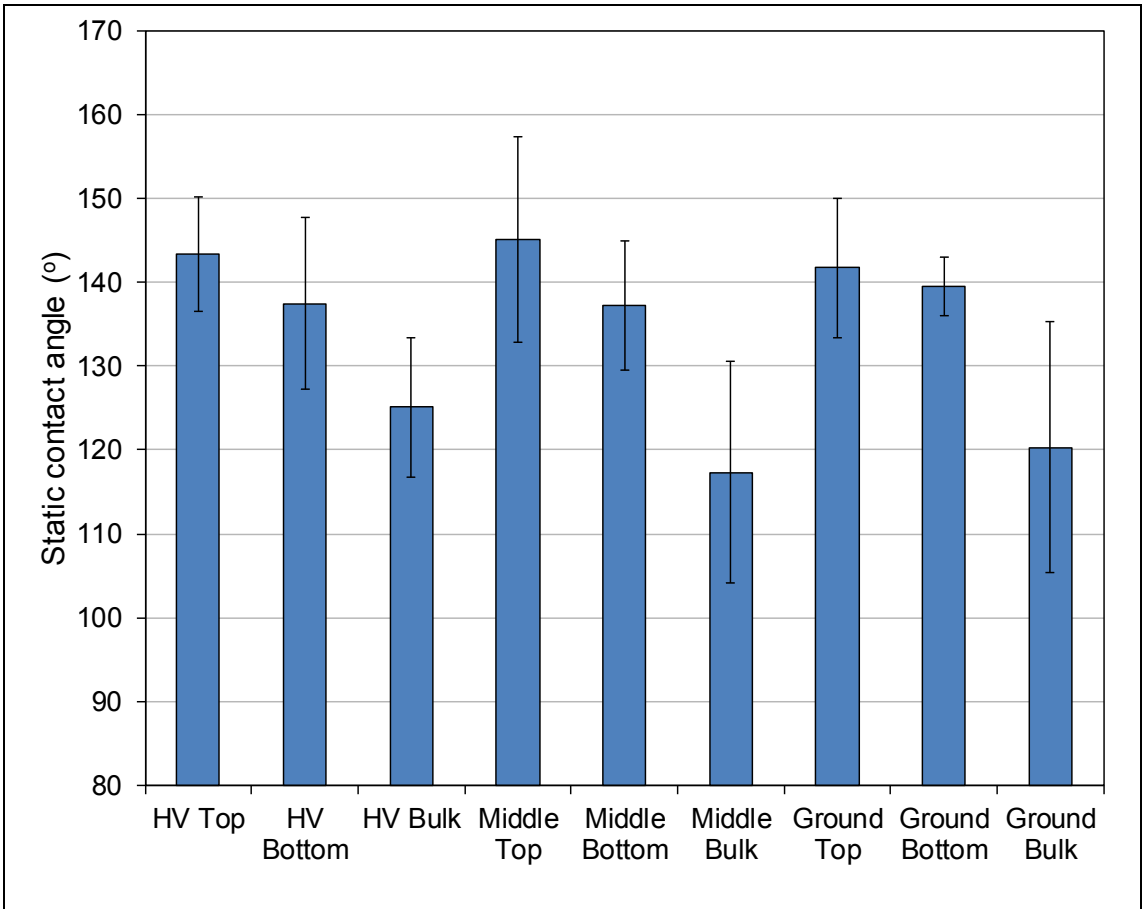
Μονωτήρας	Τμήμα	Πλευρά	θαν(ο)	stdev (ο)
P11	HV	HV Top	139,70	6,04
P11	HV	HV Bottom	141,53	8,08
P11	HV	HV Bulk	120,97	5,54
P11	Middle	Middle Top	142,54	6,64
P11	Middle	Middle Bottom	139,74	4,41
P11	Middle	Middle Bulk	120,56	10,66
P11	ground	Ground Top	131,14	15,37
P11	ground	Ground Bottom	139,68	4,63
P11	ground	Ground Bulk	126,81	11,18



Σχήμα 4.40. Στατική γωνία επαφής στην άνω, κάτω επιφάνεια των πτερυγίων καθώς και στο εσωτερικό υλικό τους κατά μήκος του μονωτήρα P11.

4.3.2.2.12 Μονωτήρας P12

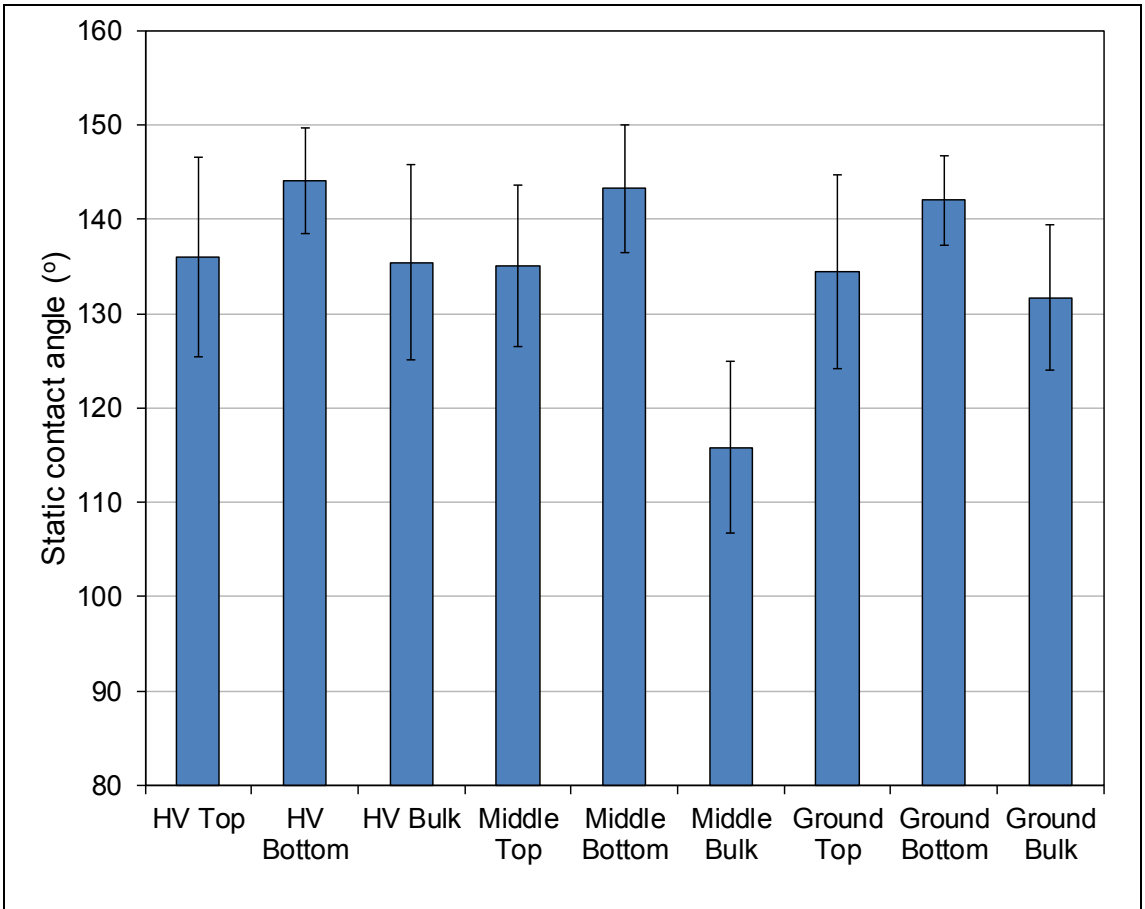
Μονωτήρας	Τμήμα	Πλευρά	θαν(ο)	stdev (ο)
P12	HV	HV Top	143,36	6,86
P12	HV	HV Bottom	137,45	10,28
P12	HV	HV Bulk	125,12	8,29
P12	Middle	Middle Top	145,11	12,28
P12	Middle	Middle Bottom	137,21	7,70
P12	Middle	Middle Bulk	117,31	13,22
P12	ground	Ground Top	141,73	8,33
P12	ground	Ground Bottom	139,49	3,44
P12	ground	Ground Bulk	120,33	15,00



Σχήμα 4.41. Στατική γωνία επαφής στην άνω, κάτω επιφάνεια των πτερυγίων καθώς και στο εσωτερικό υλικό τους κατά μήκος του μονωτήρα P12.

4.3.2.2.13 Μονωτήρας P13

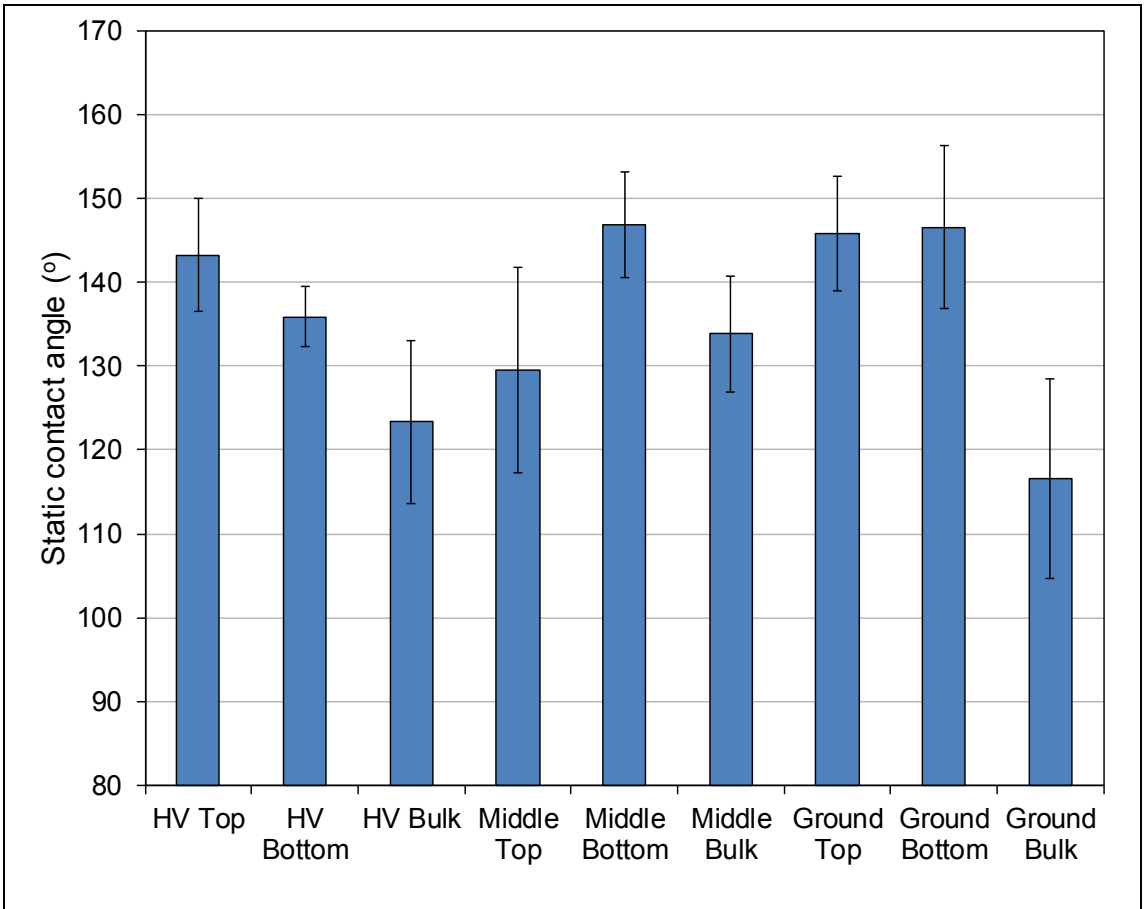
Μονωτήρας	Τμήμα	Πλευρά	θαν(ο)	stdev (ο)
P13	HV	HV Top	136,03	10,55
P13	HV	HV Bottom	144,08	5,55
P13	HV	HV Bulk	135,44	10,39
P13	Middle	Middle Top	135,07	8,59
P13	Middle	Middle Bottom	143,28	6,75
P13	Middle	Middle Bulk	115,83	9,09
P13	ground	Ground Top	134,44	10,33
P13	ground	Ground Bottom	141,98	4,73
P13	ground	Ground Bulk	131,68	7,68



Σχήμα 4.42. Στατική γωνία επαφής στην άνω, κάτω επιφάνεια των πτερυγίων καθώς και στο εσωτερικό υλικό τους κατά μήκος του μονωτήρα P13.

4.3.2.2.14 Μονωτήρας P14

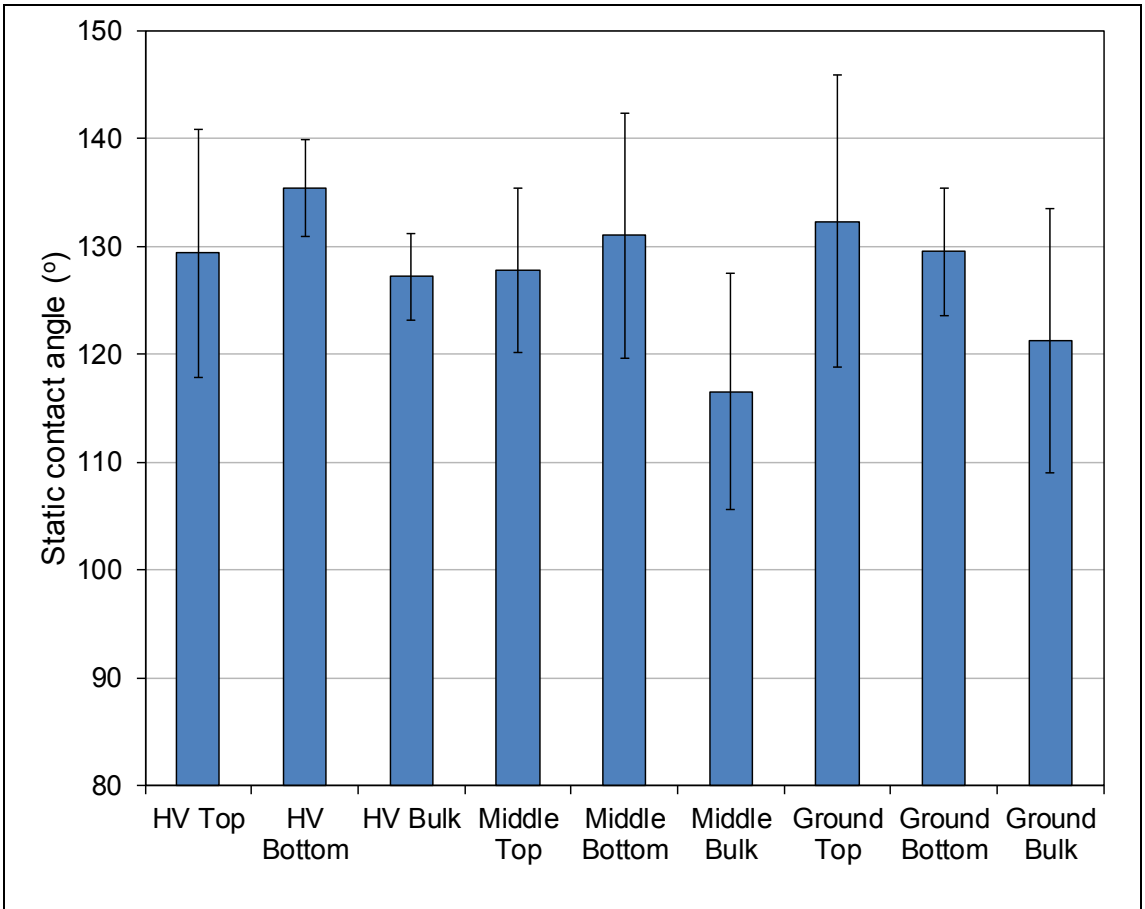
Μονωτήρας	Τμήμα	Πλευρά	θαν(ο)	stdev (ο)
P14	HV	HV Top	143,24	6,70
P14	HV	HV Bottom	135,84	3,59
P14	HV	HV Bulk	123,32	9,66
P14	Middle	Middle Top	129,58	12,24
P14	Middle	Middle Bottom	146,85	6,33
P14	Middle	Middle Bulk	133,80	6,86
P14	ground	Ground Top	145,76	6,79
P14	ground	Ground Bottom	146,54	9,68
P14	ground	Ground Bulk	116,59	11,83



Σχήμα 4.43. Στατική γωνία επαφής στην άνω, κάτω επιφάνεια των πτερυγίων καθώς και στο εσωτερικό υλικό τους κατά μήκος του μονωτήρα P14.

4.3.2.2.15 Μονωτήρας P15

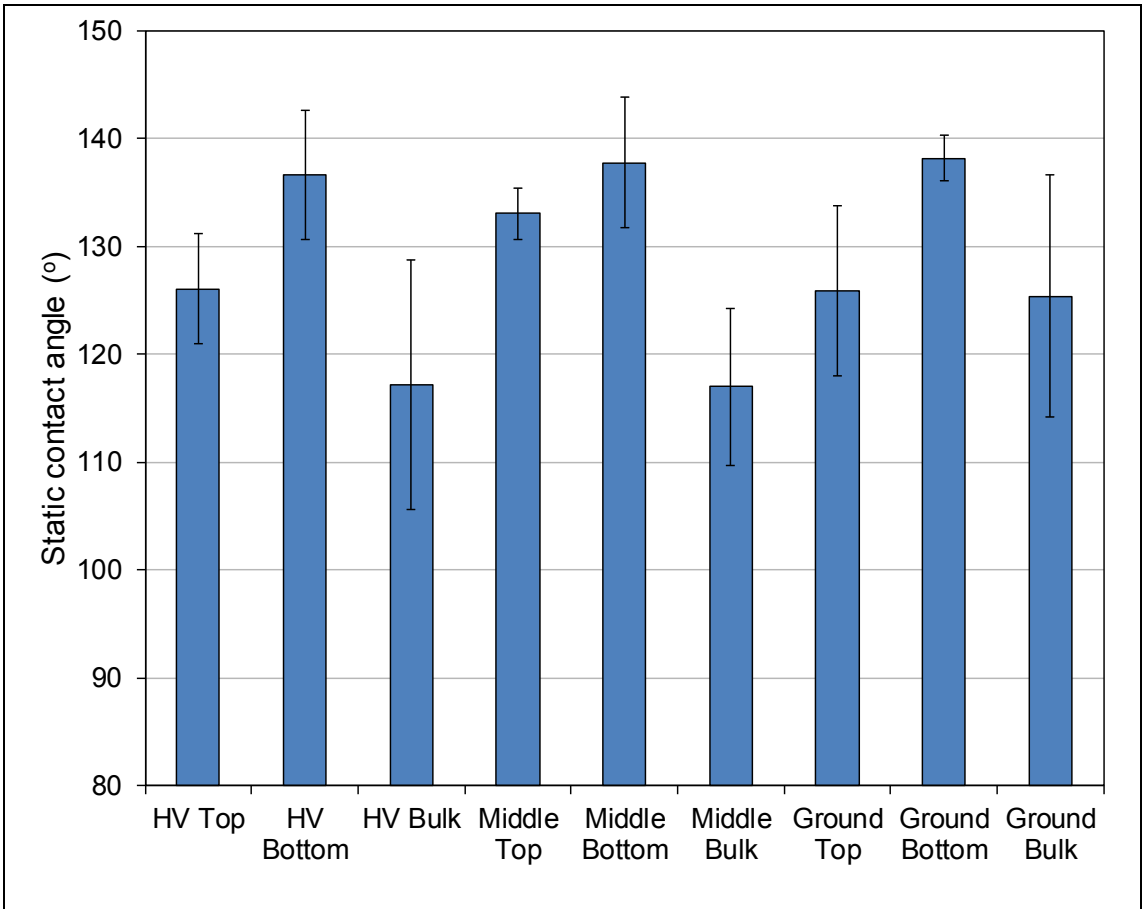
Μονωτήρας	Τμήμα	Πλευρά	θαν(ο)	stdev (ο)
P15	HV	HV Top	129,34	11,48
P15	HV	HV Bottom	135,40	4,52
P15	HV	HV Bulk	127,17	4,01
P15	Middle	Middle Top	127,73	7,59
P15	Middle	Middle Bottom	131,01	11,35
P15	Middle	Middle Bulk	116,52	10,96
P15	ground	Ground Top	132,31	13,57
P15	ground	Ground Bottom	129,48	5,91
P15	ground	Ground Bulk	121,23	12,21



Σχήμα 4.44. Στατική γωνία επαφής στην άνω, κάτω επιφάνεια των πτερυγίων καθώς και στο εσωτερικό υλικό τους κατά μήκος του μονωτήρα P15.

4.3.2.2.16 Μονωτήρας P16

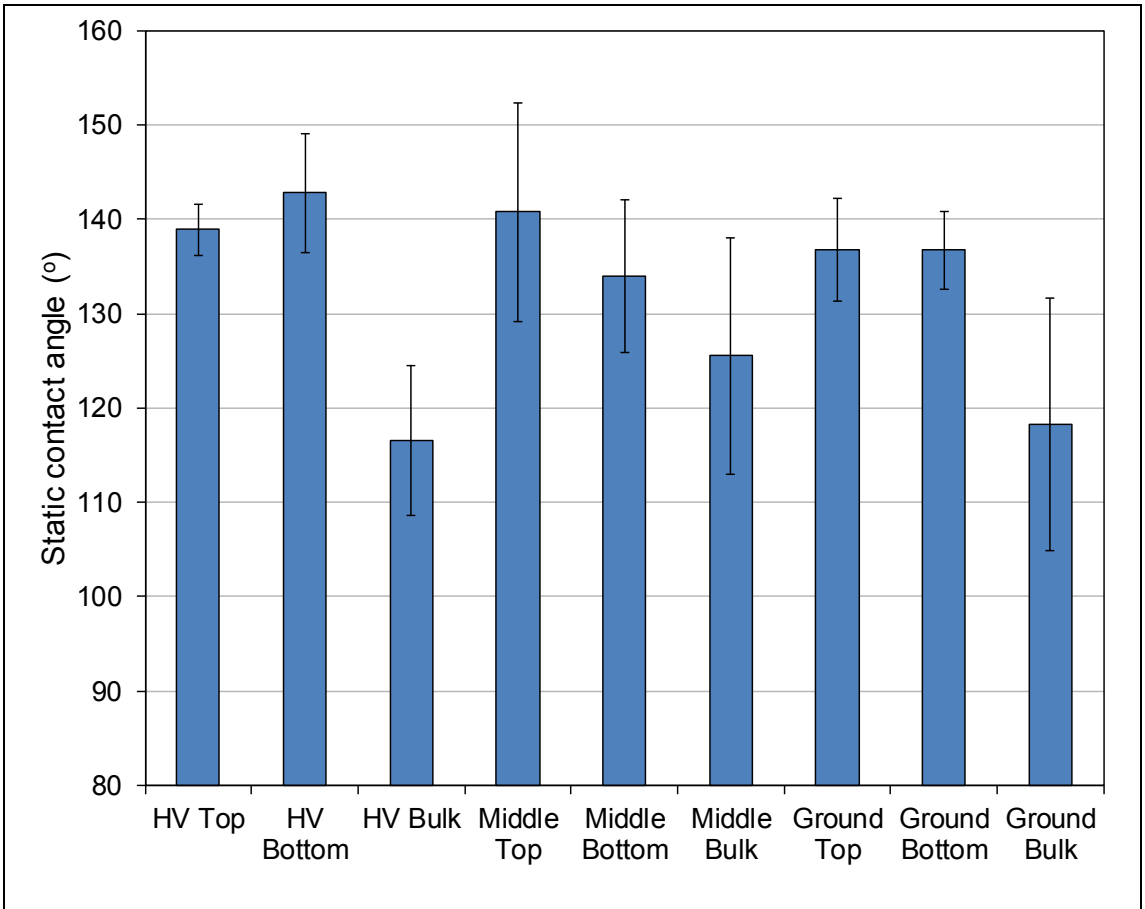
Μονωτήρας	Τμήμα	Πλευρά	θαν(ο)	stdev (ο)
P16	HV	HV Top	126,06	5,07
P16	HV	HV Bottom	136,56	5,99
P16	HV	HV Bulk	117,14	11,59
P16	Middle	Middle Top	133,02	2,38
P16	Middle	Middle Bottom	137,76	6,05
P16	Middle	Middle Bulk	116,98	7,25
P16	ground	Ground Top	125,83	7,89
P16	ground	Ground Bottom	138,12	2,09
P16	ground	Ground Bulk	125,38	11,19



Σχήμα 4.45. Στατική γωνία επαφής στην άνω, κάτω επιφάνεια των πτερυγίων καθώς και στο εσωτερικό υλικό τους κατά μήκος του μονωτήρα P16.

4.3.2.2.17 Μονωτήρας P17

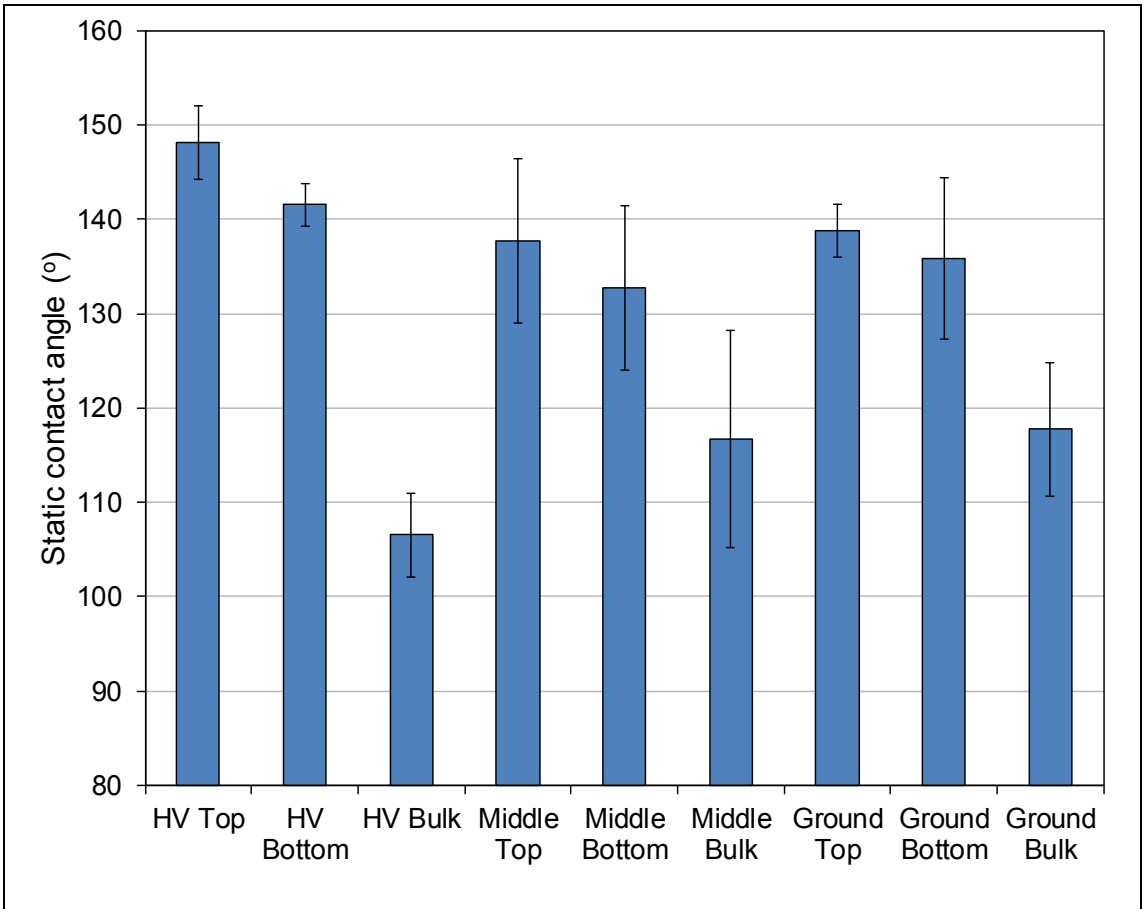
Μονωτήρας	Τμήμα	Πλευρά	θαν(ο)	stdev (ο)
P17	HV	HV Top	138,88	2,66
P17	HV	HV Bottom	142,80	6,31
P17	HV	HV Bulk	116,58	7,91
P17	Middle	Middle Top	140,74	11,52
P17	Middle	Middle Bottom	133,95	8,07
P17	Middle	Middle Bulk	125,52	12,50
P17	ground	Ground Top	136,76	5,41
P17	ground	Ground Bottom	136,71	4,16
P17	ground	Ground Bulk	118,22	13,40



Σχήμα 4.46. Στατική γωνία επαφής στην άνω, κάτω επιφάνεια των πτερυγίων καθώς και στο εσωτερικό υλικό τους κατά μήκος του μονωτήρα P17.

4.3.2.2.18 Μονωτήρας P18

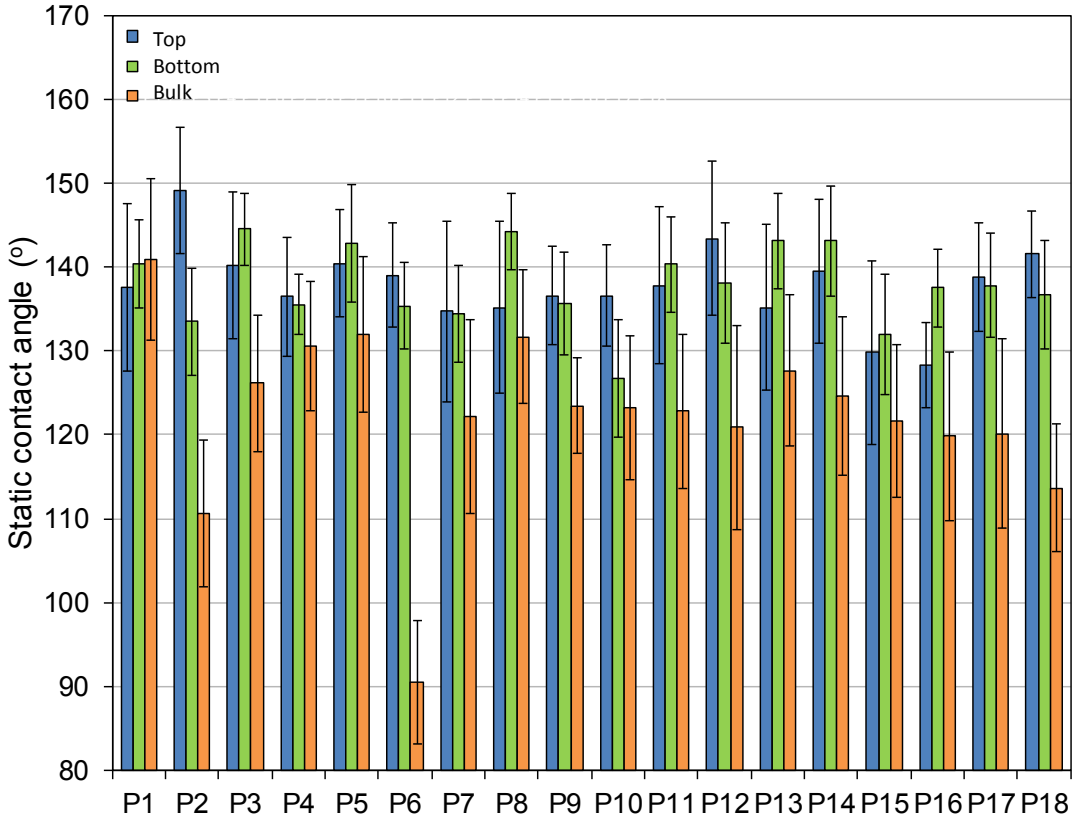
Μονωτήρας	Τμήμα	Πλευρά	θαν(ο)	stdev (ο)
P18	HV	HV Top	148,09	3,87
P18	HV	HV Bottom	141,54	2,26
P18	HV	HV Bulk	106,52	4,37
P18	Middle	Middle Top	137,68	8,74
P18	Middle	Middle Bottom	132,70	8,72
P18	Middle	Middle Bulk	116,70	11,48
P18	ground	Ground Top	138,83	2,78
P18	ground	Ground Bottom	135,78	8,56
P18	ground	Ground Bulk	117,74	7,10



Σχήμα 4.47. Στατική γωνία επαφής στην άνω, κάτω επιφάνεια των πτερυγίων καθώς και στο εσωτερικό υλικό τους κατά μήκος του μονωτήρα P18.

4.3.2.2.19 Συζήτηση- Στατική Γωνία Επαφής

Στο Σχήμα 1.48 συνοψίζονται οι μέσες τιμές των στατικών γωνιών επαφής των δειγμάτων που έχουν ληφθεί κατά μήκος του πολυμερικού περιβλήματος για την άνω επιφάνεια (top surface), την κάτω επιφάνεια(bottom surface) και το εσωτερικό υλικό (bulk material) για κάθε μονωτήρα.

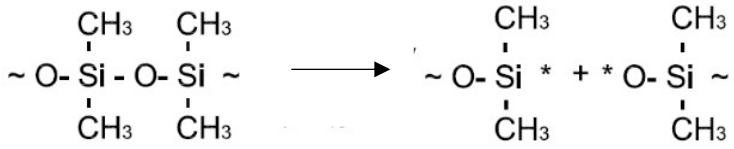


Σχήμα 4.48. Στατική γωνία επαφής στην άνω, κάτω επιφάνεια των πτερυγίων καθώς και στο εσωτερικό υλικό τους κατά μήκος του μονωτήρα P2.

Από τα αποτελέσματα του Σχήματος 4.48, προκύπτει ότι:

- Το υλικό επιφάνειας του πολυμερικού περιβλήματος των μονωτήρων εξακολουθεί και είναι υδρόφοβο παρά την θερμική καταπόνηση που υπέστει από την δασική πυρκαγιά. Το αποτέλεσμα αυτό είναι σε συμφωνία με τις μετρήσεις διαβροχής με την μέθοδο του ψεκασμού.
- Η στατική γωνία επαφής είναι μεγαλύτερη στο υλικό επιφάνειας σε σχέση με το εσωτερικό υλικό. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να ερμηνευθεί από τις αντιδράσεις διάσπασης (Σχήμα 4.49) [22] που λαμβάνουν χώρα στην δομή του πολυμερούς σιλικόνης λόγω της θερμότητας που εκλύθηκε από την πυρκαγιά. Η συγκεκριμένη μεταβολή στην μοριακή δομή του υλικού σχετίζεται με τον σχηματισμό στοιχείων χαμηλού μοριακού βάρους (LMW), τα οποία αναδύονται στο υλικό επιφανείας, και είναι αυτά που ευθύνονται για την ιδιότητα μεταφοράς και ανάκαμψης της υδροφοβίας στα υλικά σιλικόνης [10], [23]. Αντίστοιχη συμπεριφορά είχε

παρατηρηθεί σε μονωτήρα που είχε στην επιφάνεια του εμφανή ίχνη καύσης εξαιτίας της ανάπτυξη μολυσματικού τόξου στην επιφάνεια του [8].



Σχήμα 4.49. Αντίδραση διάσπασης του πολυμερούς σιλικόνης .

- Η στατική γωνία επαφής του εσωτερικού υλικού των μονωτήρων της Ομάδας Β, δηλαδή των μονωτήρων P2 και P6, είναι μικρότερη σε σχέση την αντίστοιχη του εσωτερικού υλικού των μονωτήρων της Ομάδας Α. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να ερμηνευθεί από την διαφορετική σύσταση ανάμεσα στους μονωτήρες της Ομάδας Α και Β (Ενότητα 1.3.3).

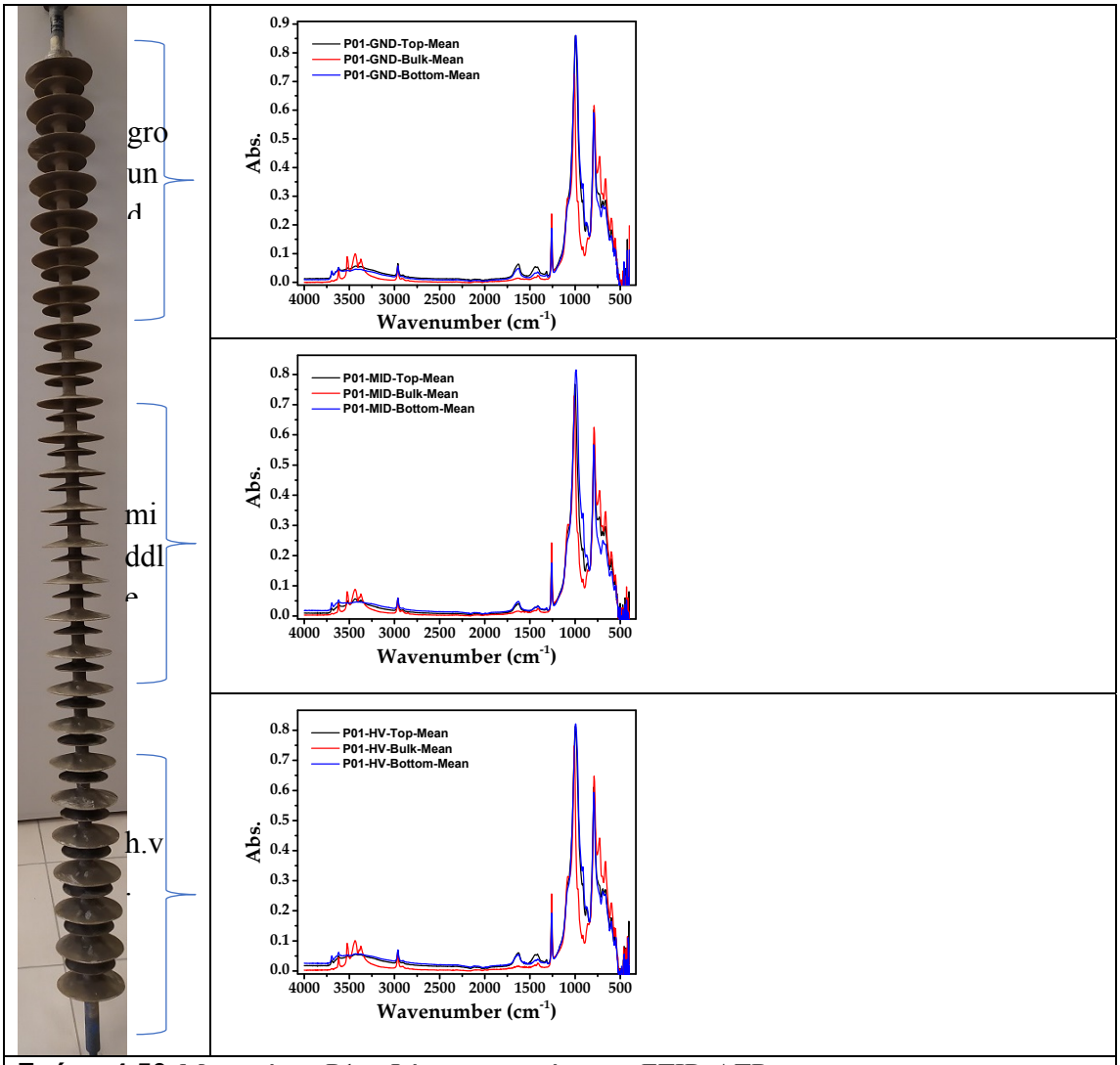
.

4.3.3 Ανάλυση φασματοσκοπίας υπερύθρου με αποσβένουσα ολική ανάκλαση

Μετρήσεις φασματοσκοπίας υπερύθρου με την μέθοδο της αποσβένουσας ολικής ανάκλασης διεξήχθησαν πριν τον καθαρισμό των δειγμάτων που είχαν ληφθεί κατά μήκος του πολυμερικού περιβλήματος του μονωτήρα. Για την αξιολόγηση της μεταβολής της μοριακής δομής του υλικού επιφανείας των δειγμάτων λαμβάνεται ως αναφορά το φάσμα απορρόφησης υπερύθρου του εσωτερικού υλικού του πολυμερικού περιβλήματος.

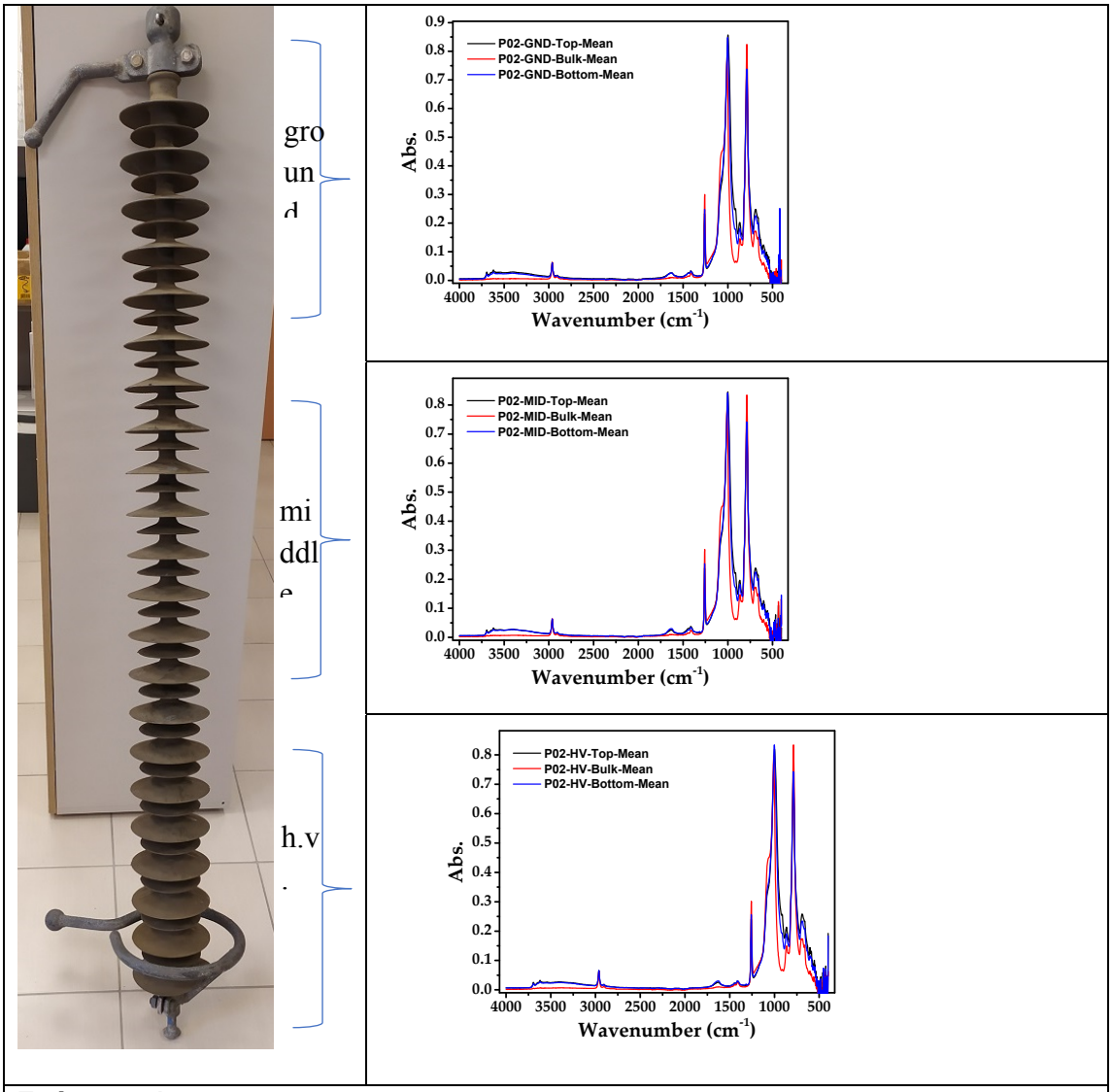
Στα Σχήματα 4.50-4.67 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά φάσματα απορρόφησης υπερύθρου του υλικού επιφανείας (άνω (top) και κάτω (bottom) επιφάνεια) των δειγμάτων πριν τον καθαρισμό τους, καθώς και το χαρακτηριστικό φάσμα απορρόφησης υπερύθρου του εσωτερικού υλικού (bulk) του πολυμερικού περιβλήματος.

4.3.3.1.1 Μονωτήρας P1



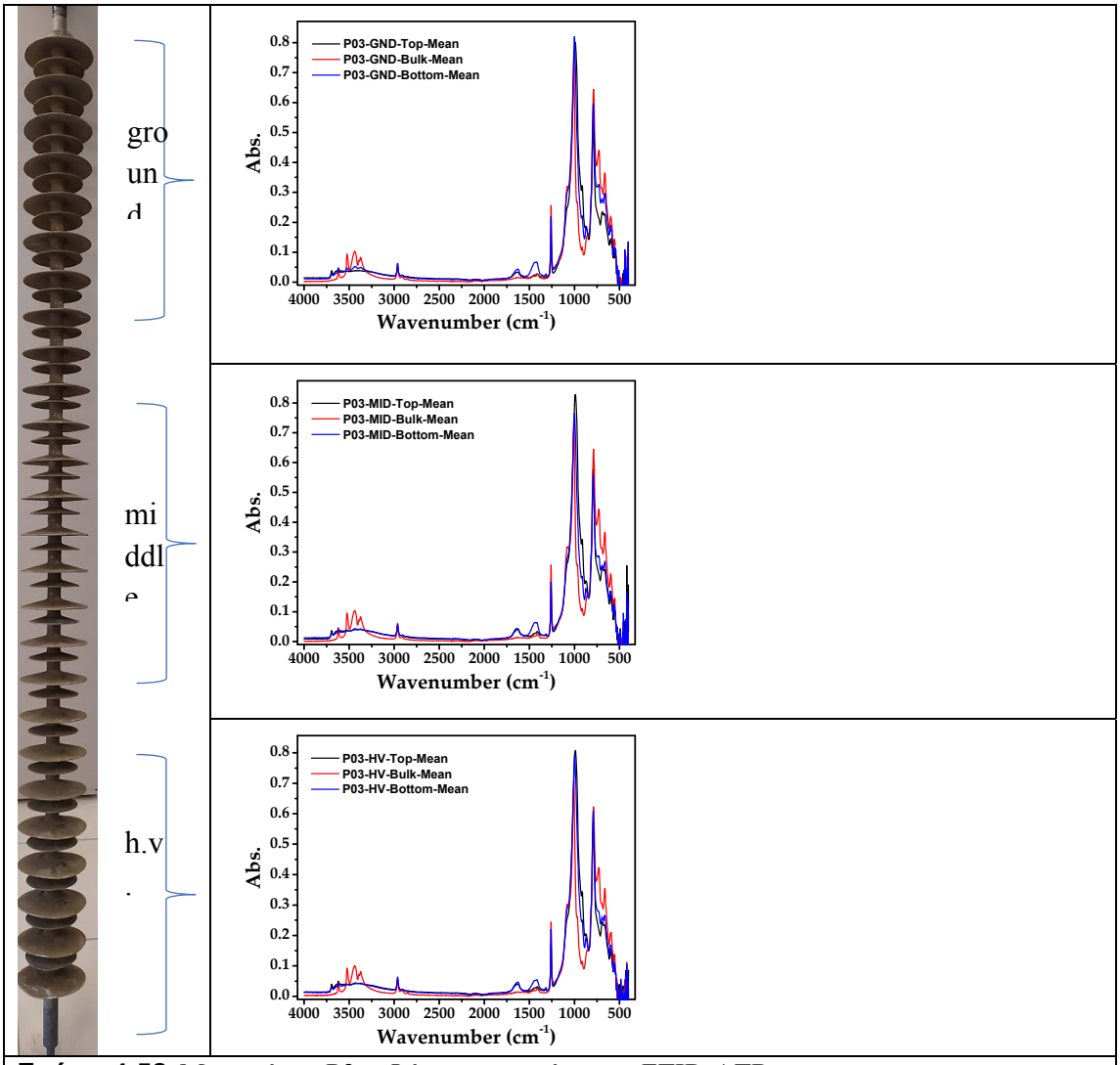
Σχήμα 4.50. Μονωτήρας P1 – Φάσμα απορρόφησης FTIR-ATR

4.3.3.1.2 Μονωτήρας P2



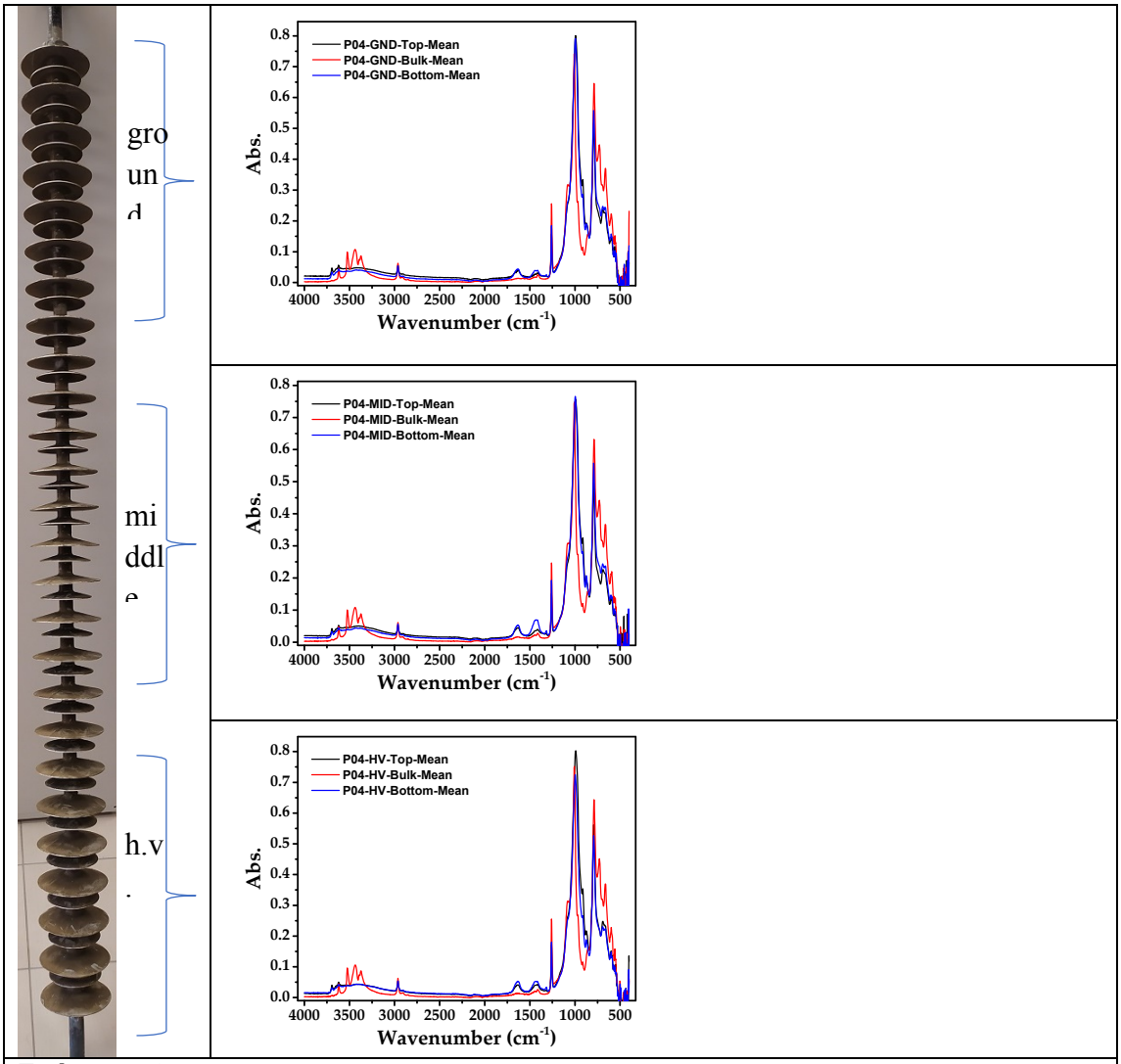
Σχήμα 4.51. Μονωτήρας P2 – – Φάσμα απορρόφησης FTIR-ATR

4.3.3.1.3 Μονωτήρας P3



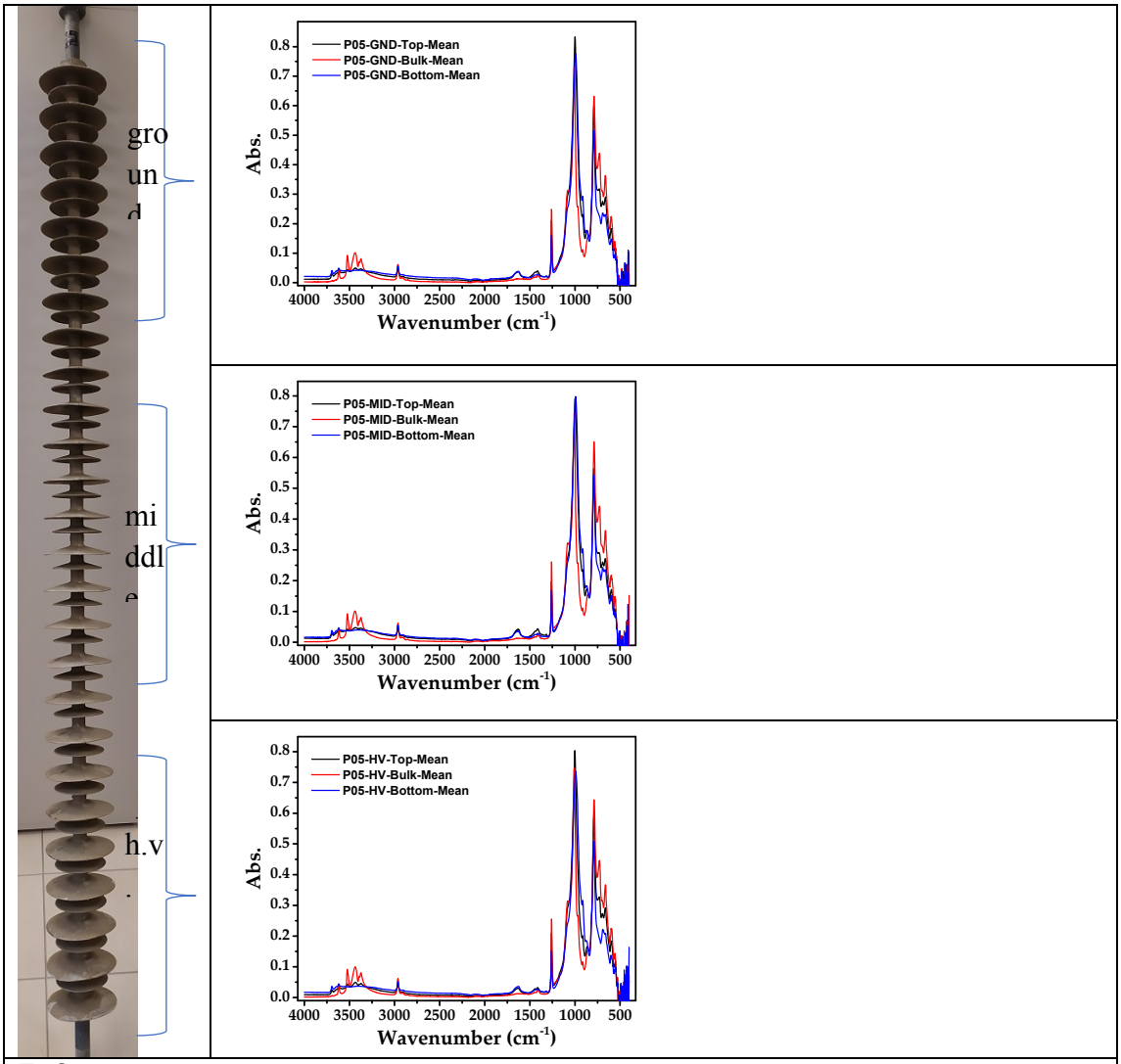
Σχήμα 4.52. Μονωτήρας P3 – Φάσμα απορρόφησης FTIR-ATR

4.3.3.1.4 Μονωτήρας P4



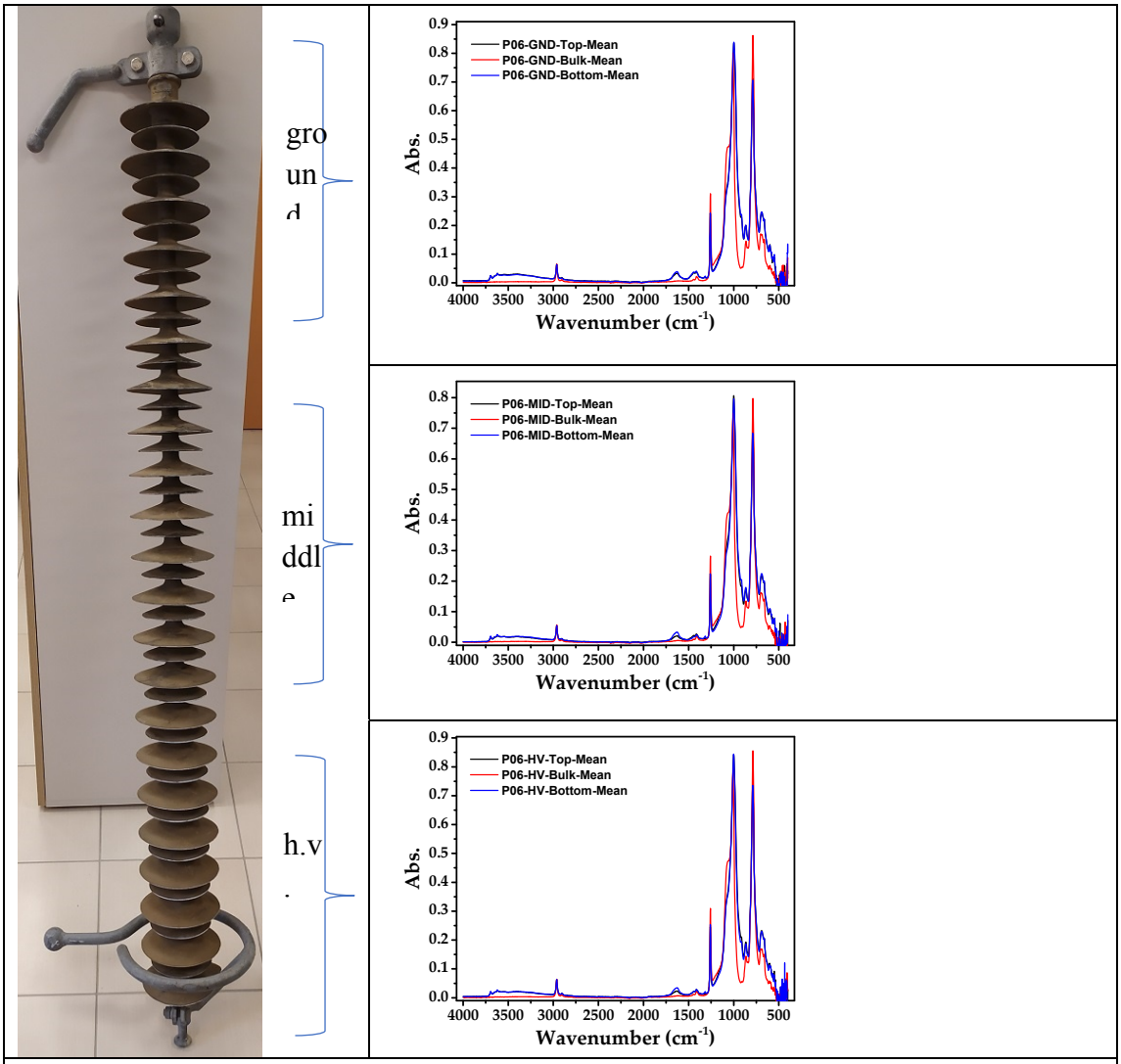
Σχήμα 4.53. Μονωτήρας P4 – Φάσμα απορρόφησης FTIR-ATR

4.3.3.1.5 Μονωτήρας P5



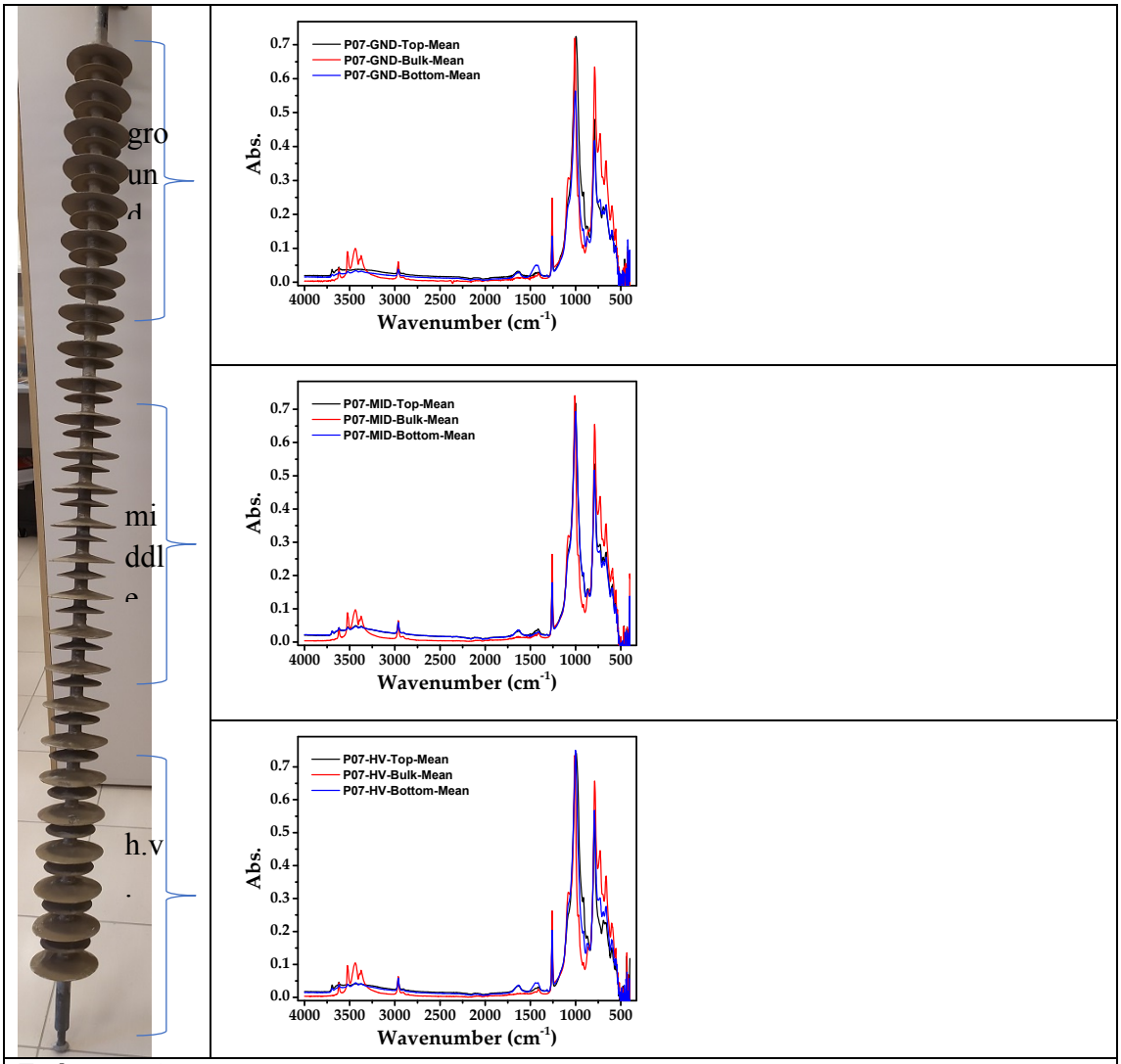
Σχήμα 4.54. Μονωτήρας P5 – Φάσμα απορρόφησης FTIR-ATR

4.3.3.1.6 Μονωτήρας P6



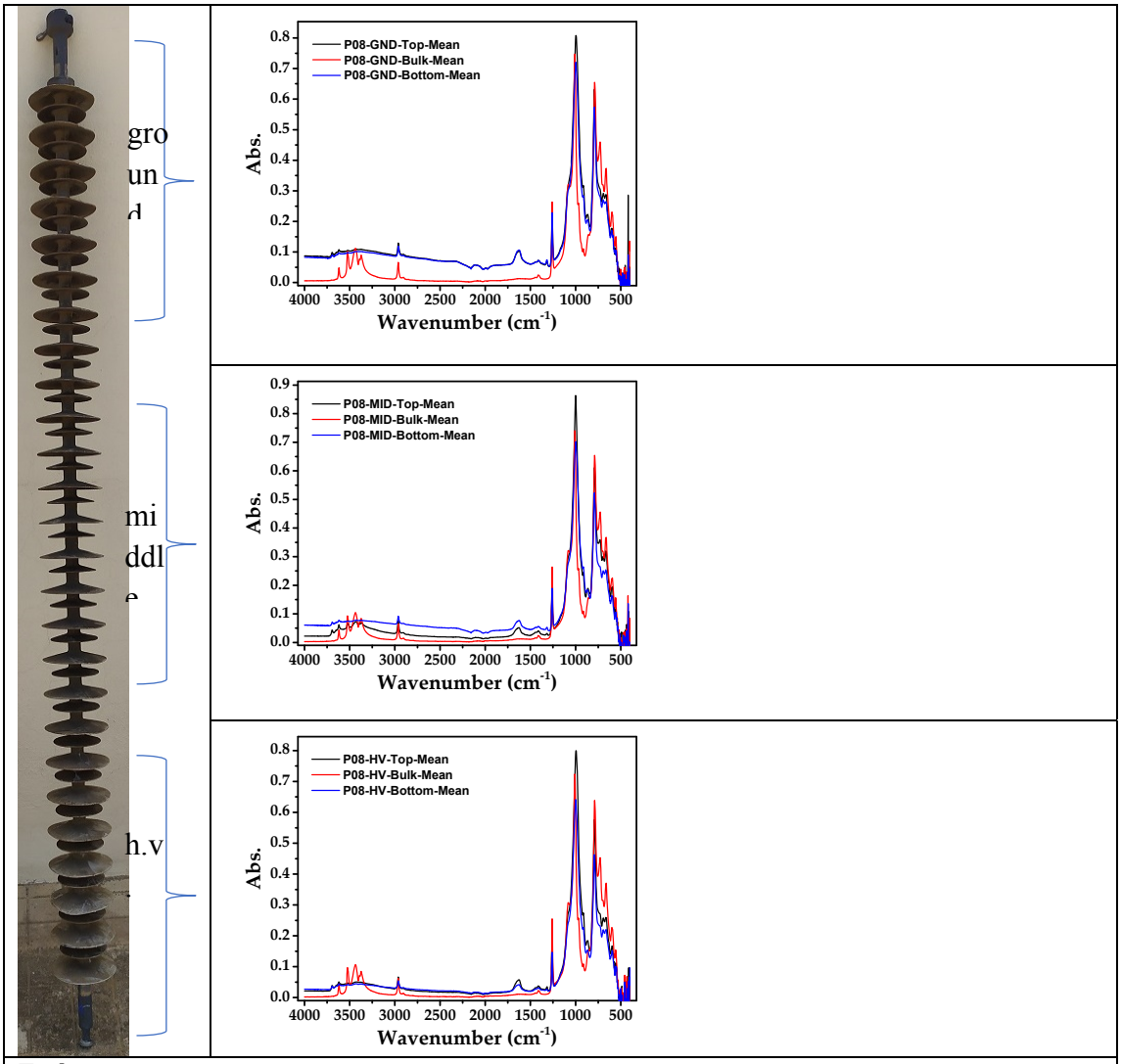
Σχήμα 4.55. Μονωτήρας P6 – Φάσμα απορρόφησης FTIR-ATR

4.3.3.1.7 Μονωτήρας P7



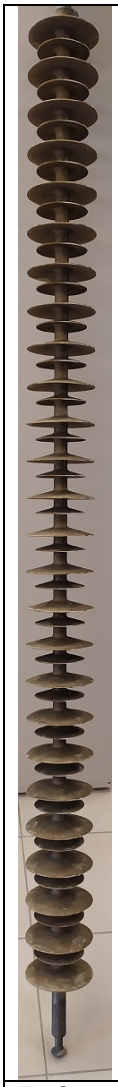
Σχήμα 4.56. Μονωτήρας P7 – Φάσμα απορρόφησης FTIR-ATR

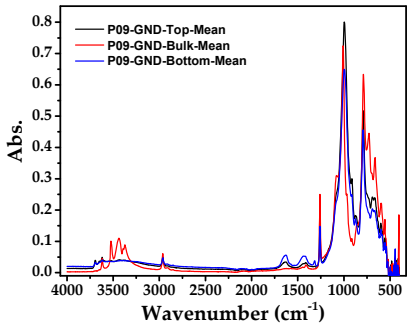
4.3.3.1.8 Μονωτήρας P8

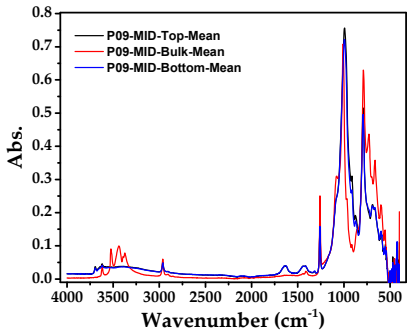


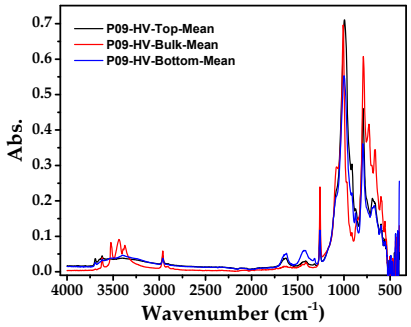
Σχήμα 4.57. Μονωτήρας P8 – Φάσμα απορρόφησης FTIR-ATR

4.3.3.1.9 Μονωτήρας P9



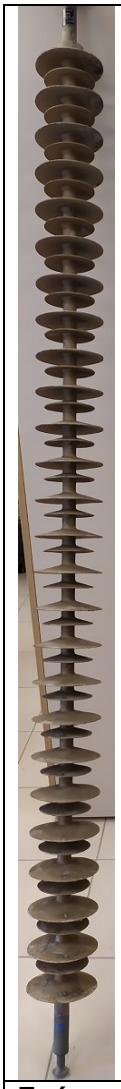


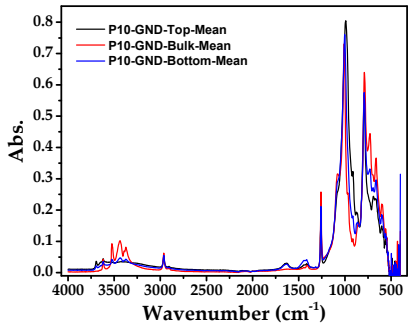


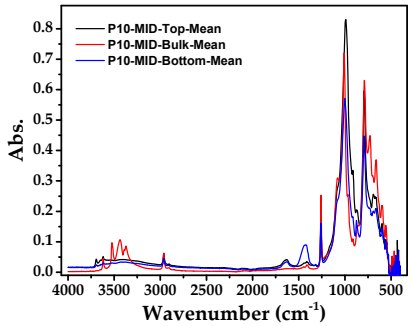


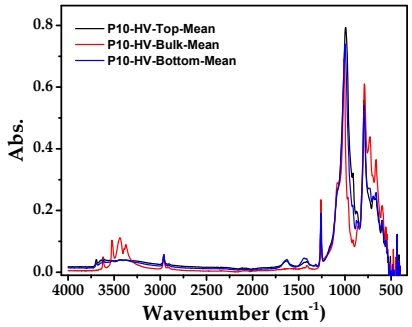
Σχήμα 4.58. Μονωτήρας P9 – Φάσμα απορρόφησης FTIR-ATR

4.3.3.1.10 Μονωτήρας P10



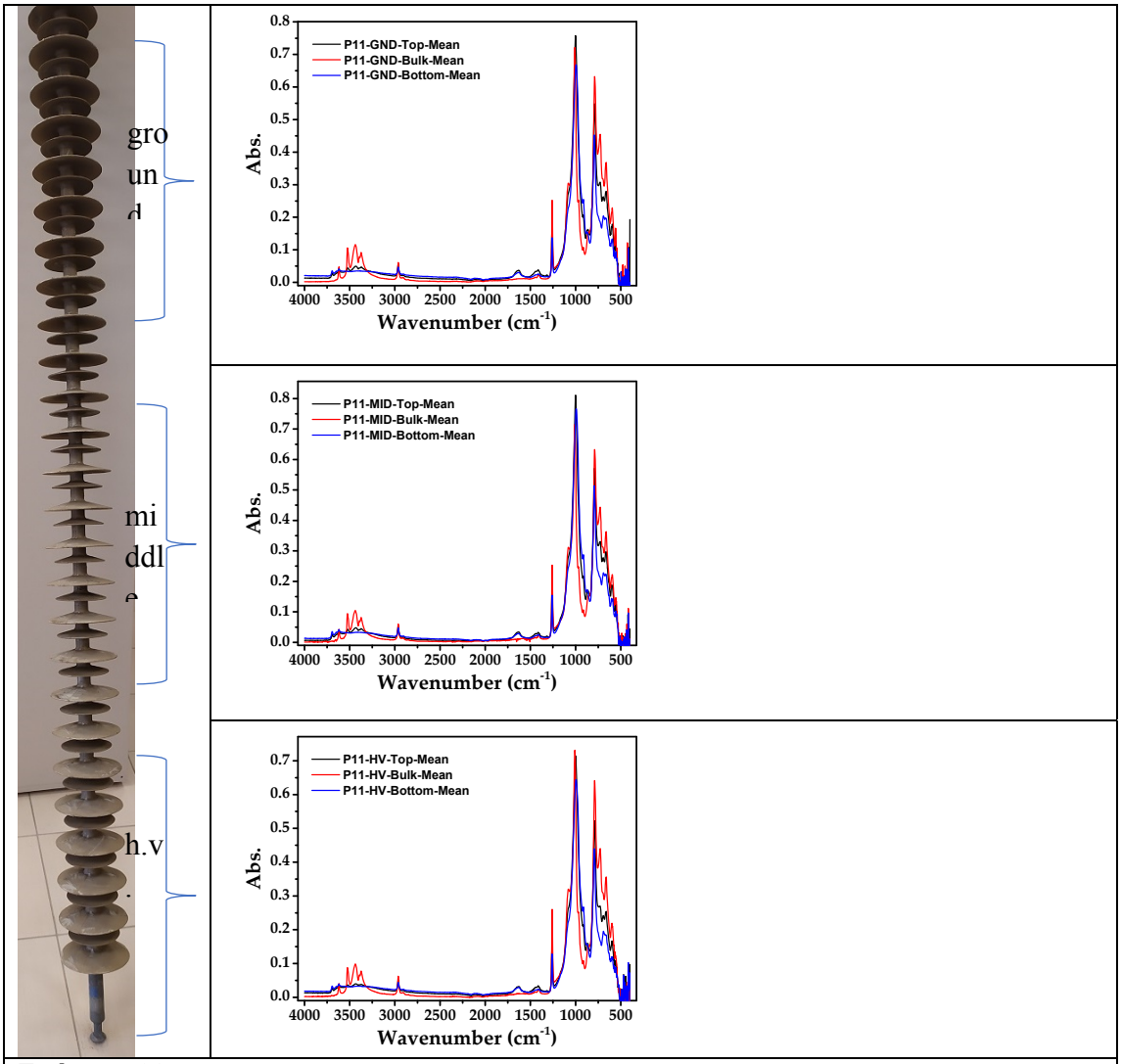






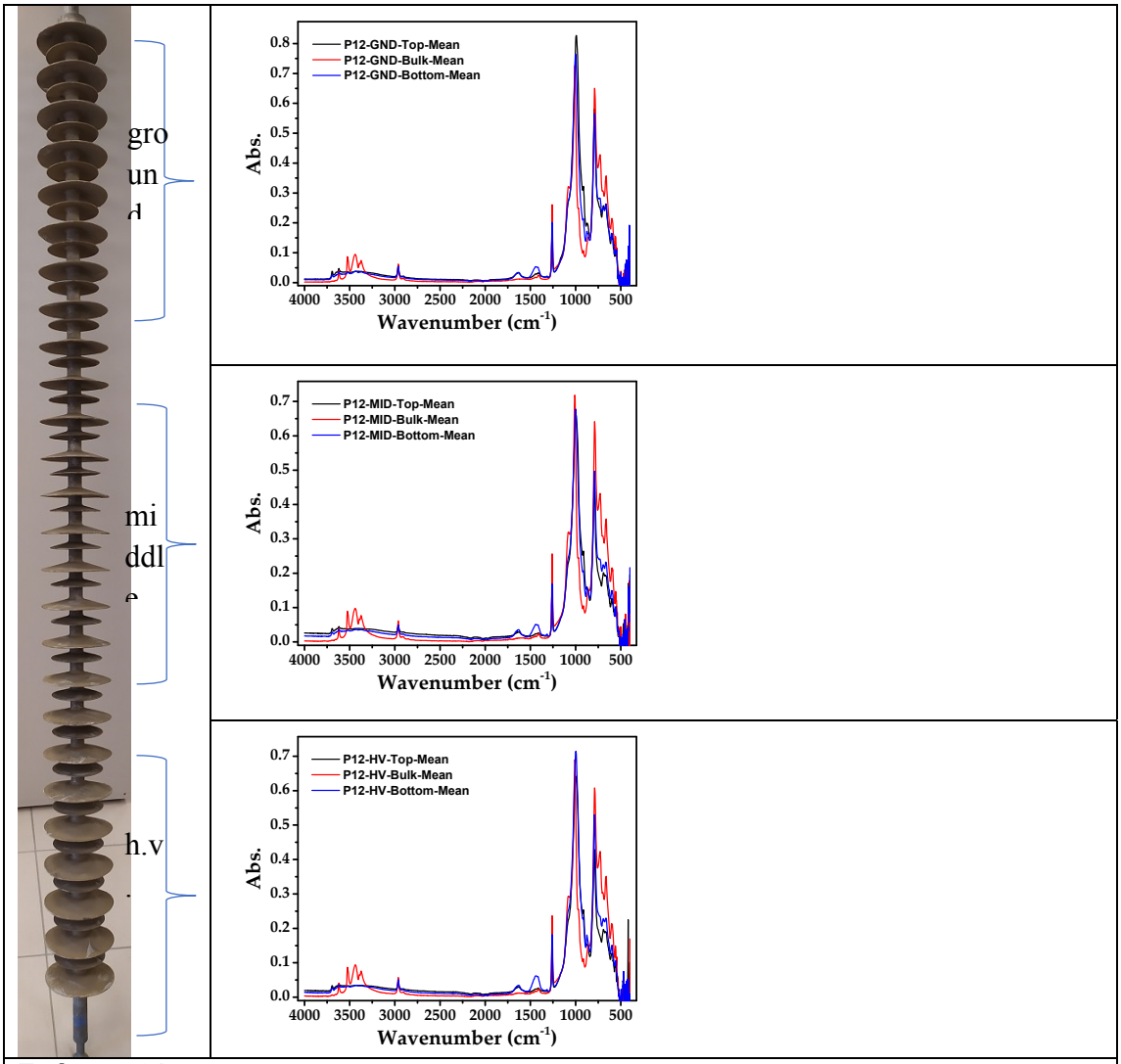
Σχήμα 4.59. Μονωτήρας P10 – Φάσμα απορρόφησης FTIR-ATR

4.3.3.1.11 Μονωτήρας P11



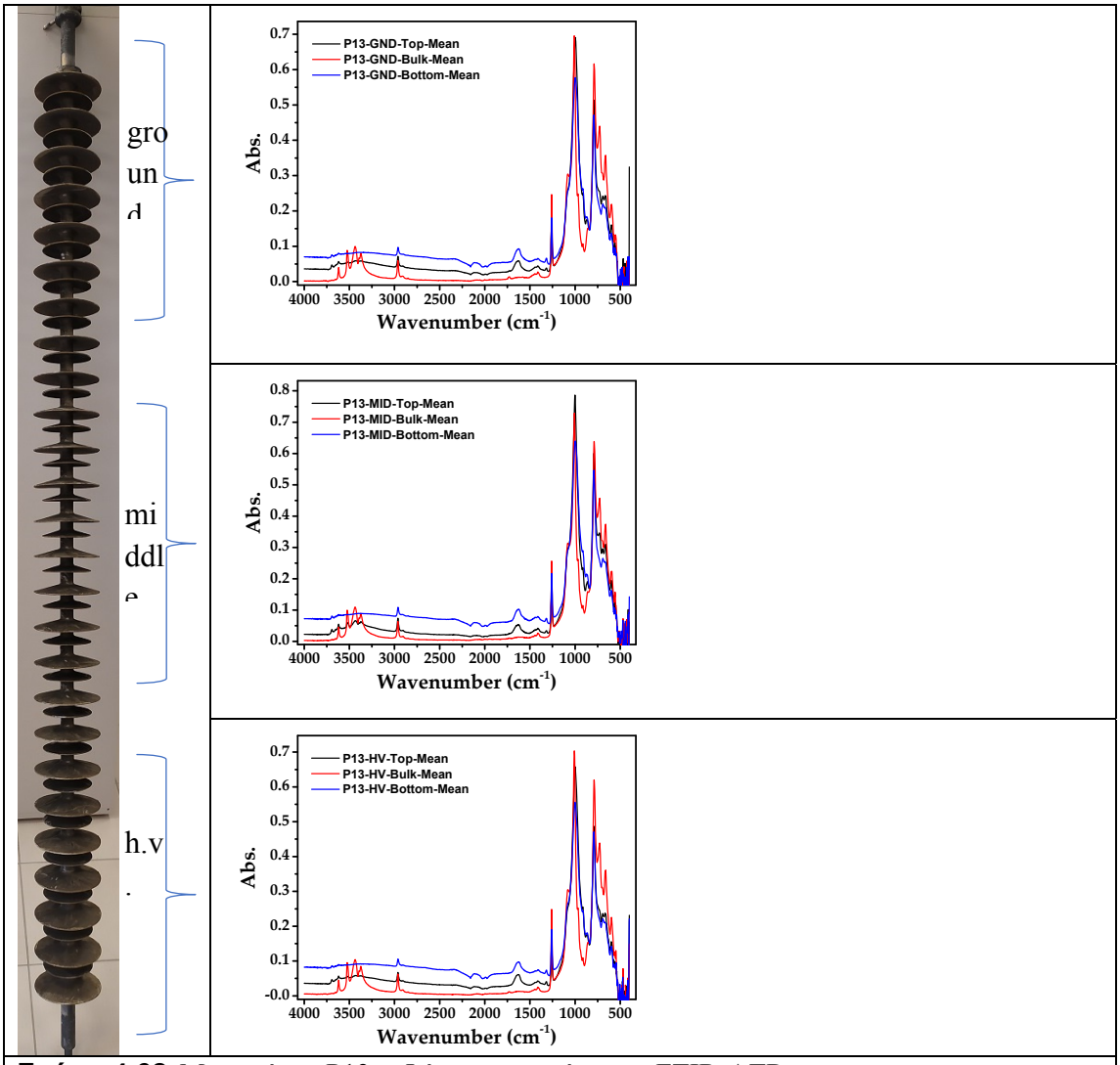
Σχήμα 4.60. Μονωτήρας P11 – Φάσμα απορρόφησης FTIR-ATR

4.3.3.1.12 Μονωτήρας P12



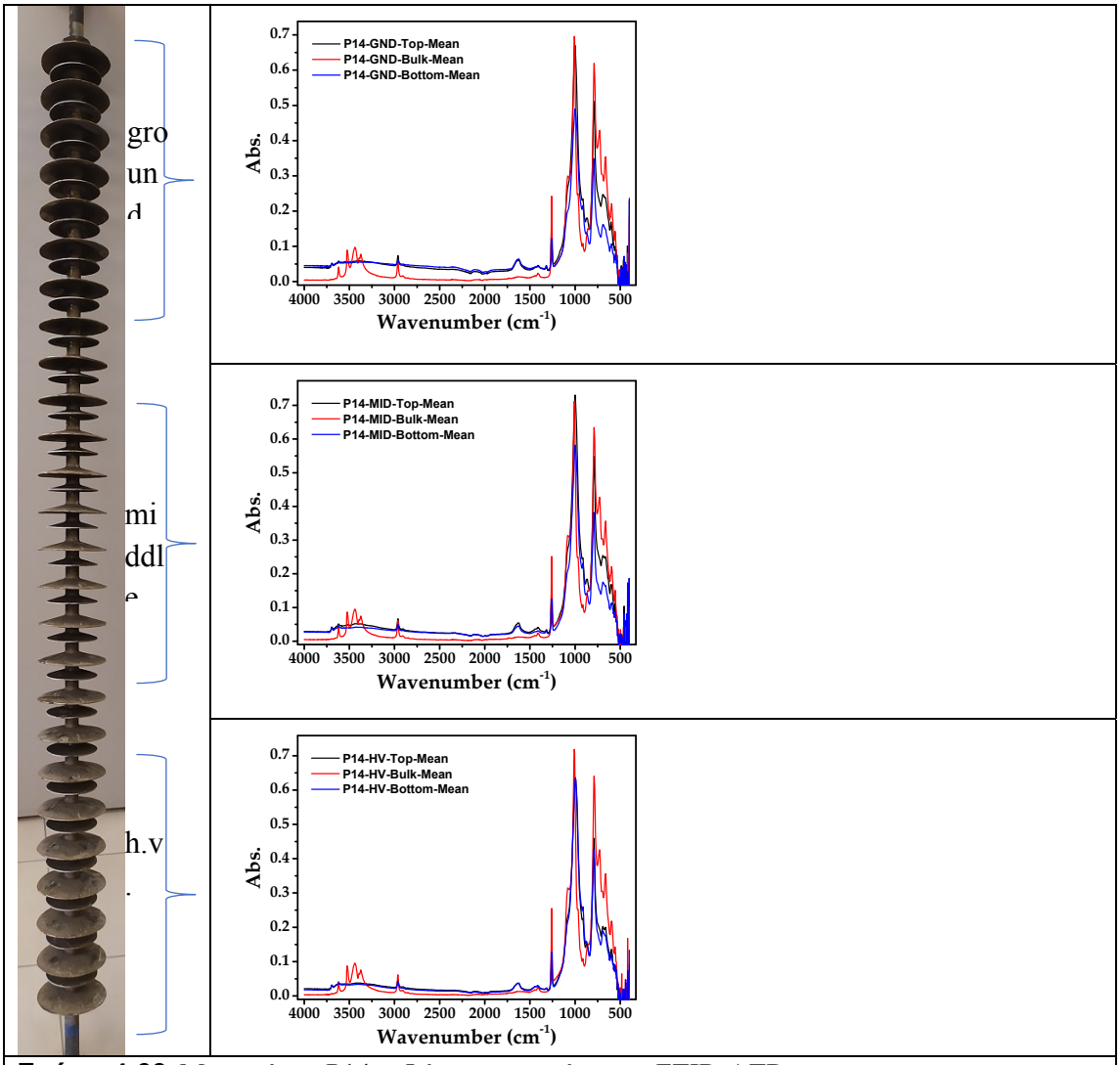
Σχήμα 4.61. Μονωτήρας P12 – Φάσμα απορρόφησης FTIR-ATR

4.3.3.1.13 Μονωτήρας P13



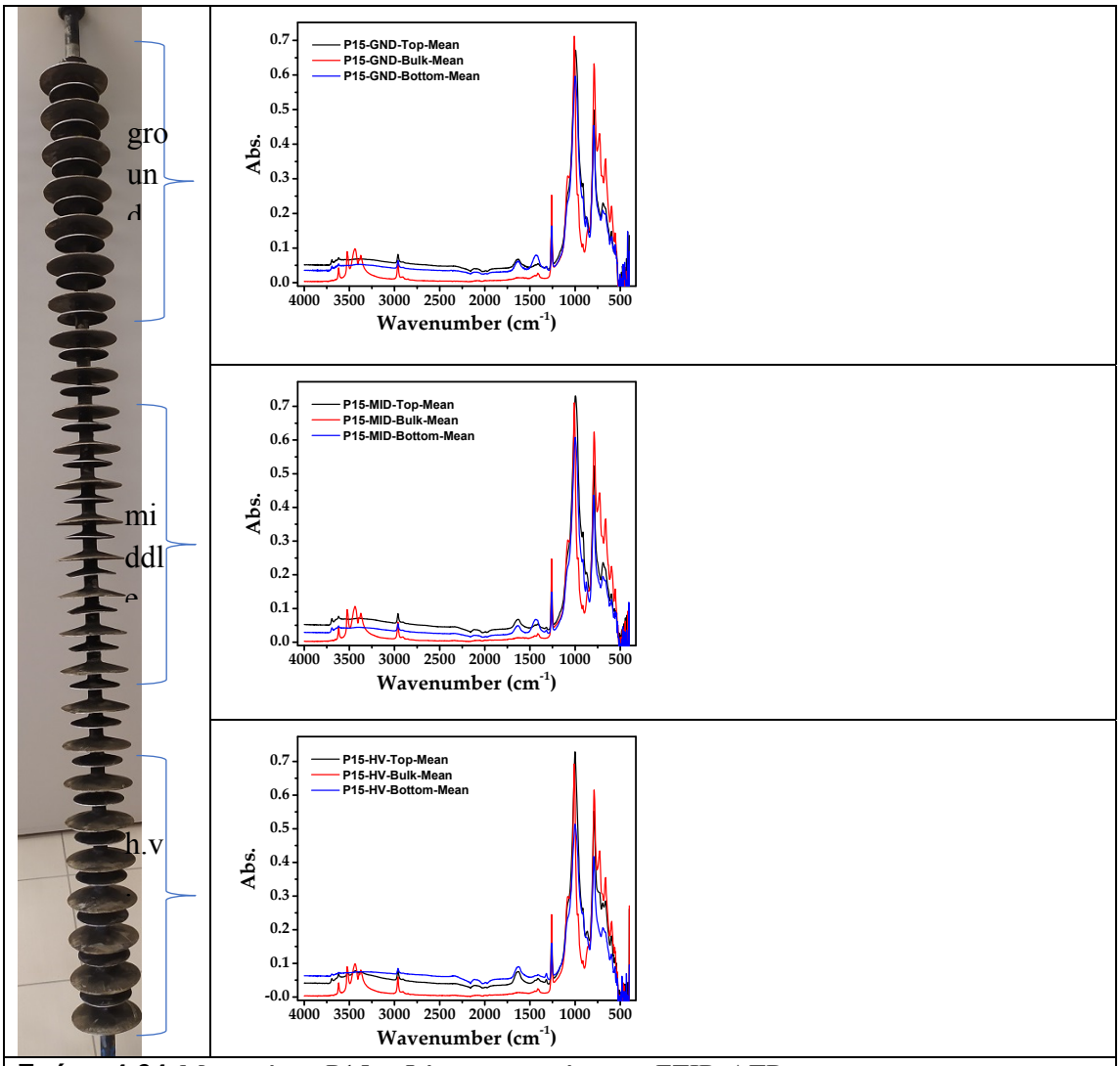
Σχήμα 4.62. Μονωτήρας P13 – Φάσμα απορρόφησης FTIR-ATR

4.3.3.1.14 Μονωτήρας P14



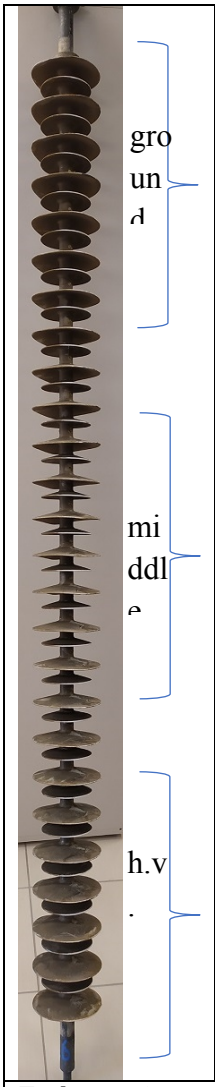
Σχήμα 4.63. Μονωτήρας P14 – Φάσμα απορρόφησης FTIR-ATR

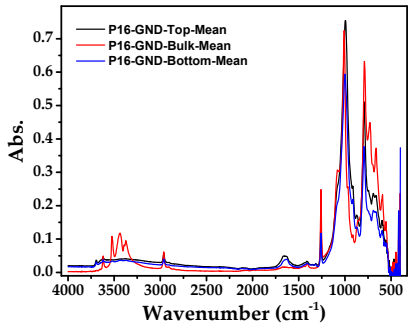
4.3.3.1.15 Μονωτήρας P15

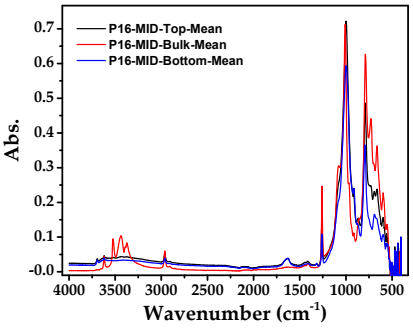


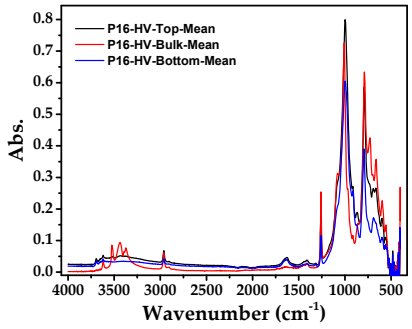
Σχήμα 4.64. Μονωτήρας P15 – Φάσμα απορρόφησης FTIR-ATR

4.3.3.1.16 Μονωτήρας P16



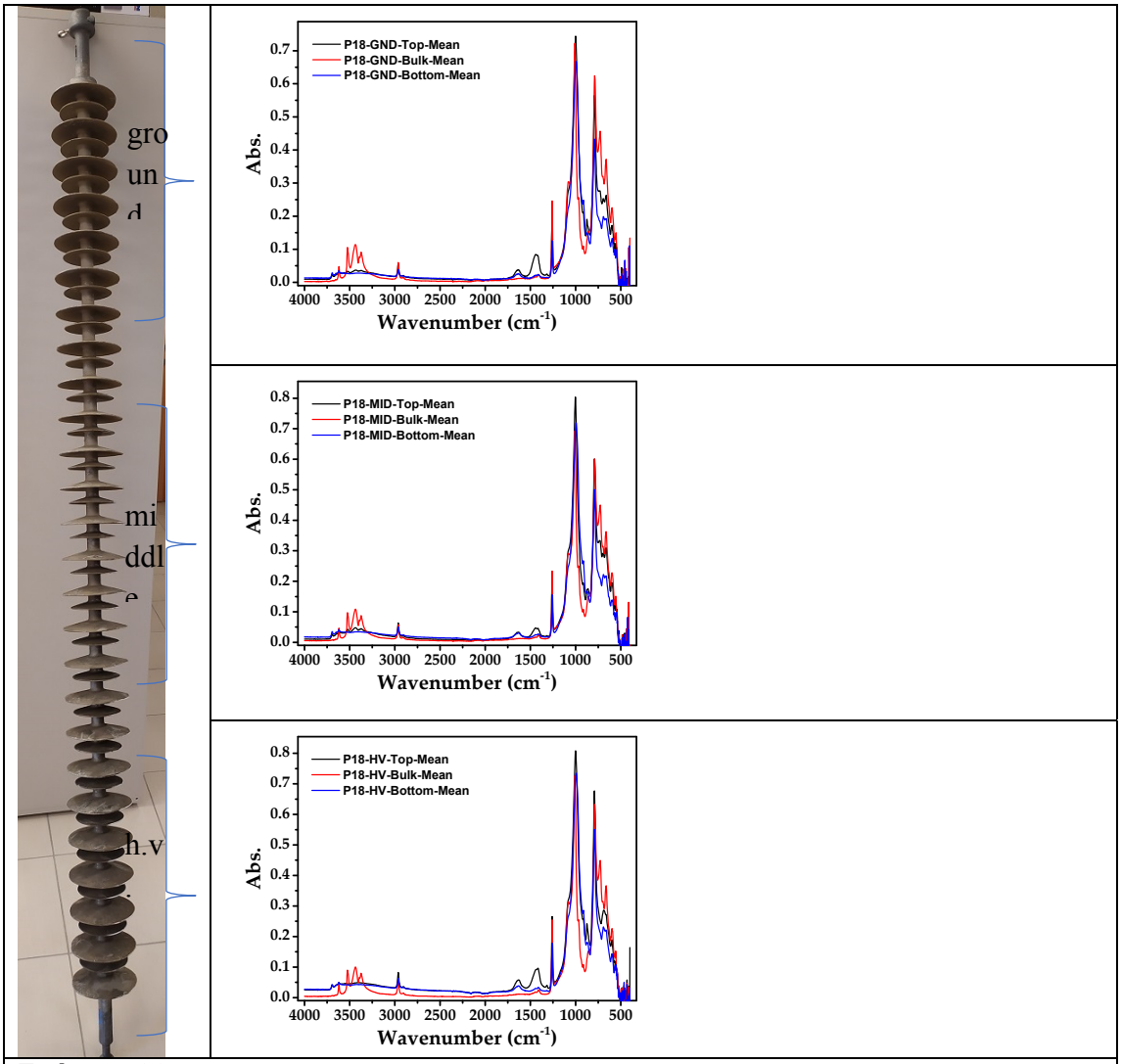






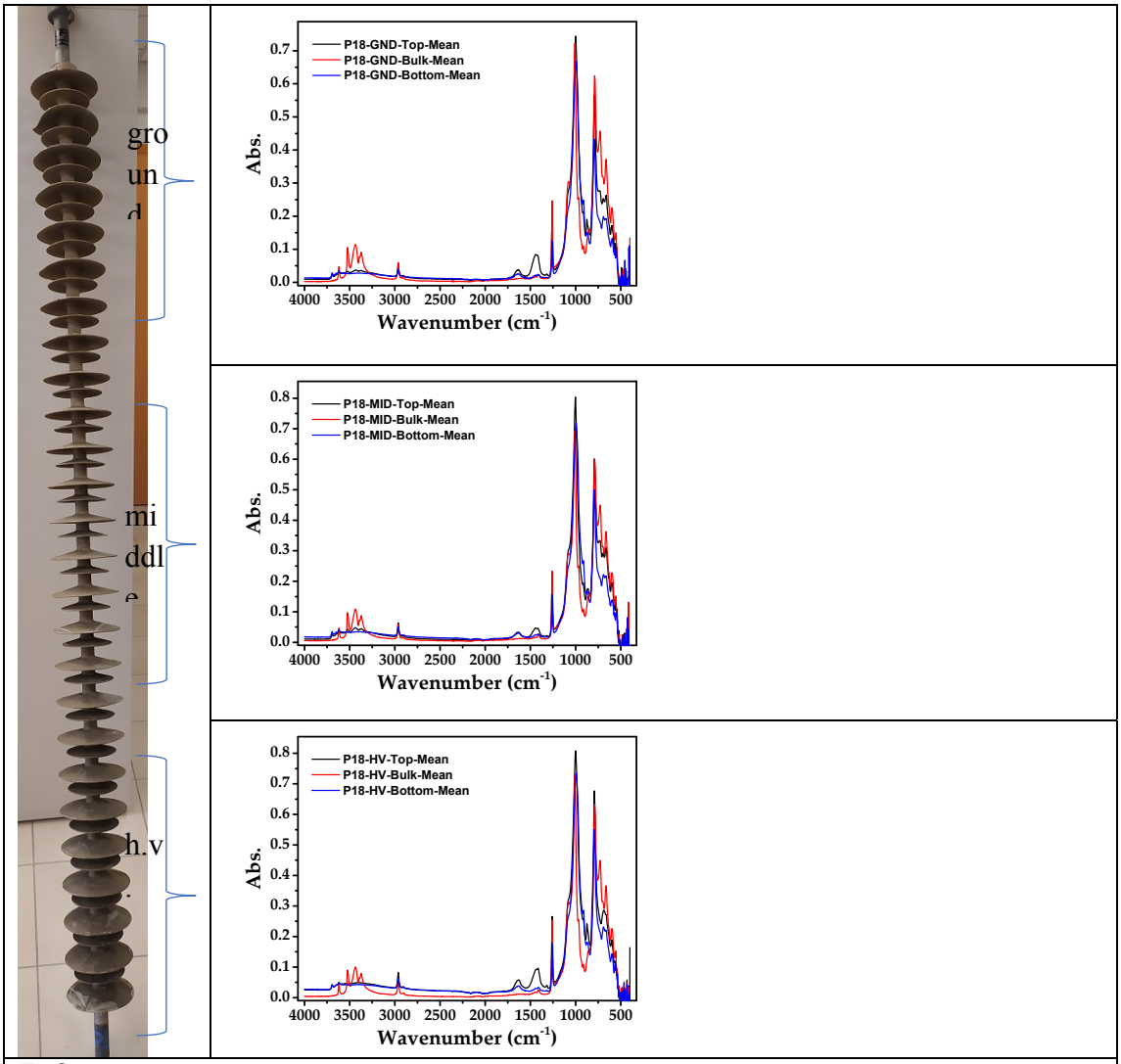
Σχήμα 4.65. Μονωτήρας P16 – Φάσμα απορρόφησης FTIR-ATR

4.3.3.1.17 Μονωτήρας P17



Σχήμα 4.66. Μονωτήρας P17 – Φάσμα απορρόφησης FTIR-ATR

4.3.3.1.18 Μονωτήρας P18

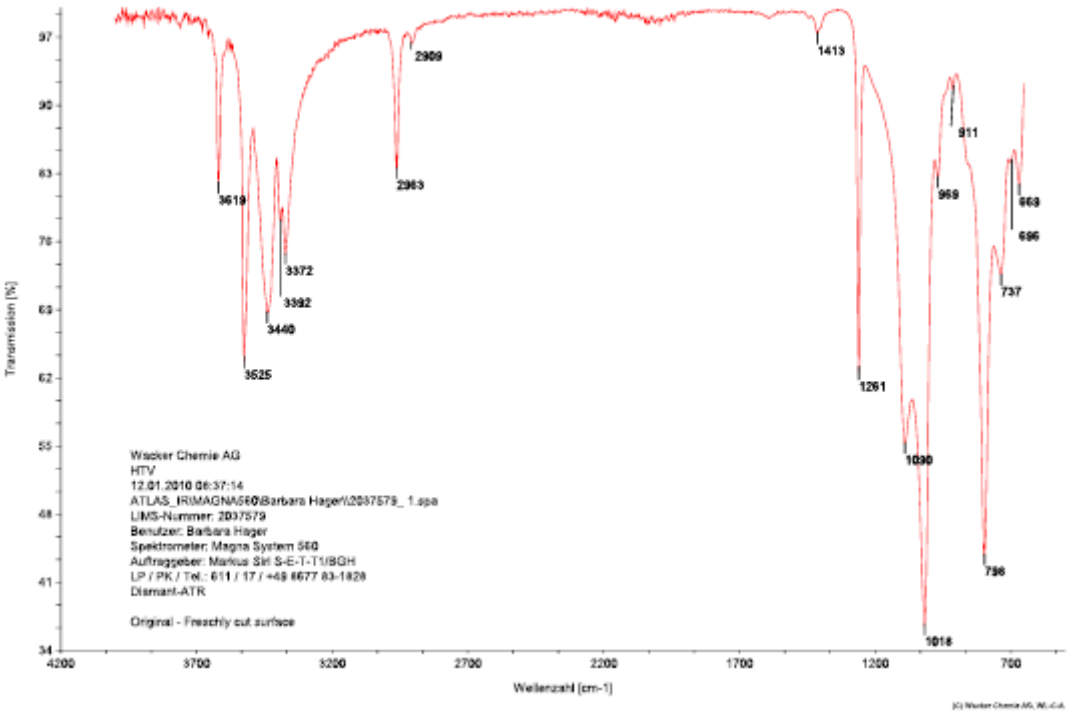


Σχήμα 4.67. Μονωτήρας P18 – Φάσμα απορρόφησης FTIR-ATR

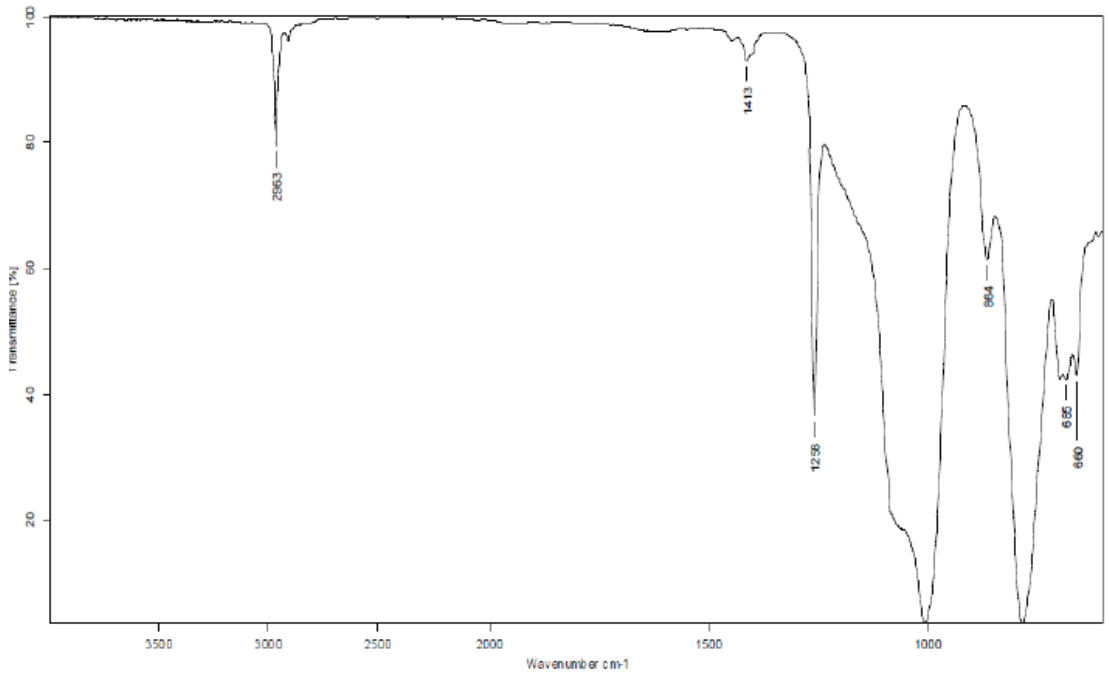
4.3.3.1.19 Συζήτηση – Φασματοσκοπία υπερύθρου

Από τις μετρήσεις FTIR-ATR στο εσωτερικό υλικό των μονωτήρων που αξιολογήθηκαν προκύπτει ότι:

- Οι μονωτήρες της Ομάδας Α (P1, P3- P5, P7-P18) είναι HTV SIR. Το φάσμα απορρόφησής τους είναι σε συμφωνία με το χαρακτηριστικό φάσμα υπερύθρου για το υλικό HTV SIR του τεχνικού οδηγού TB595 της CIGRE [24].



- Οι μονωτήρες της Ομάδας Β (P2 και P6) είναι LSR SIR. Το φάσμα απορρόφησής τους είναι σε συμφωνία με το χαρακτηριστικό φάσμα υπερύθρου για το υλικό LSR SIR του τεχνικού οδηγού TB595 της CIGRE [24].



Συνεπώς όλοι οι μονωτήρες μπορούν να χαρακτηριστούν ως συνθετικοί μονωτήρες σιλικόνης. Το πολυμερικό περίβλημα των μονωτήρων της Ομάδας Α εμπεριέχει ένυδρη αλουμίνα ΑΤΗ (απορρόφηση υπερύθρου 3200-3700 cm^{-1}) ως πρόσθετο υλικό εν αντιθέσει με τους μονωτήρες της Ομάδας Β. Οι χαρακτηριστικές περιοχές απορρόφησης υπερύρθου για τους μονωτήρες που εξετάστηκαν οφείλονται στους δεσμούς που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5.

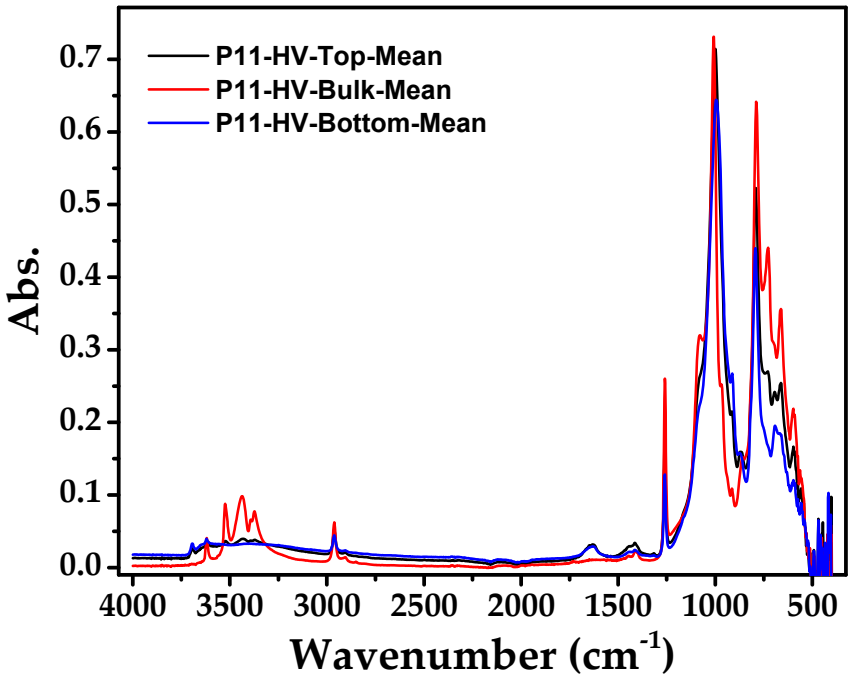
Πίνακας 4.5 Χαρακτηριστικές περιοχές απορρόφησης υπερύθρου για το υλικό HTV SIR [24]–[28].

Κυματάριθμος (cm^{-1})	**Δεσμός**
700	Si- of Si-$(CH_3)_3$
790-840	Si-O του O-Si$(CH_3)_2$-O
800-855	Si-$(CH_3)_2$
850-870	Si-O of O-Si$(CH_3)_3$
1100-1000	Si-O-Si
1255-1270	Si-CH_3
1410-1440	CH, CH_3 (δονήσεις κάμψης))
1640, (1601-1640)	OH του H_2O
2280-2380	CO_2
2960-2963	CH, CH_3 (δονήσεις τάσης)
3200-3700	OH του ΑΤΗ, Si-OH

Από την σύγκριση του φάσματος απορρόφησης υπερύθρου του υλικού επιφανείας με αυτό του εσωτερικού υλικού του πολυμερικού περιβλήματος εντοπίζονται οι ακόλουθες μεταβολές ανά ομάδα μονωτήρων.

Ομάδα Α – Μονωτήρες HTV- SIR

Το φάσμα απορρόφησης υπερύθρου του μονωτήρα P11 (Σχήμα 4.68) είναι ενδεικτικό για τις μεταβολές στην σύνθεση του υλικού του πολυμερικού περιβλήματος για τους μονωτήρες της Ομάδας Α.

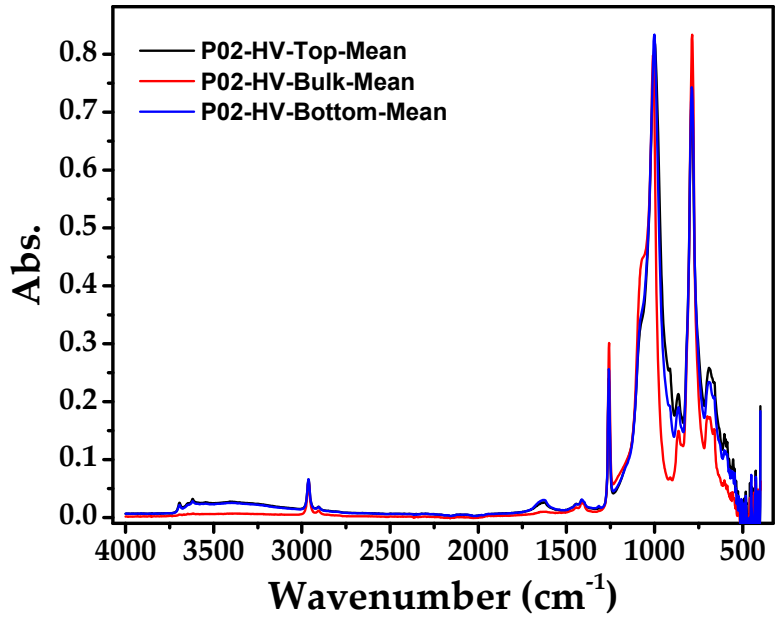


Σχήμα 4.68. Μονωτήρας P11, περιοχή υψηλή τάσης – Φάσμα απορρόφησης FTIR-ATR.

- Η απορρόφηση υπερύθρου στην περιοχή 3200-3700 cm^{-1}, που προέρχεται από του δεσμούς υδροξυλίου της ένυδρης αλουμίνας (ATH), είναι σημαντικά μειωμένη για τα υλικά επιφανείας σε σχέση με το εσωτερικό υλικό του πολυμερικού περιβλήματος
- Οι απορροφήσεις υπερύθρου που προέρχονται από τον δεσμό C-H λόγω της ύπαρξης ομάδων μεθυλίου CH_3, περιοχή 2960-2963 cm^{-1}, και από τον δεσμό Si-CH_3, περιοχή 1255-1270 cm^{-1}, στο υλικό επιφανείας είναι σημαντικά μειωμένες σε σχέση με τις αντίστοιχες του εσωτερικού υλικού.
- Η απορρόφηση υπερύθρου που προέρχεται από τους δεσμούς -OH του H_2O, περιοχή 1601-1640 cm^{-1} ,βρέθηκε αυξημένη στα υλικά επιφανείας σε σχέση με το εσωτερικό υλικό του πολυμερικού περιβλήματος. Αυτό δείχνει ότι τόσο τα στερεά υπολείμματα, προϊόντα καύσης και περιβαλλοντική ρύπανση, στο υλικό επιφανείας περιβλήματος απορροφούν υγρασία.

Ομάδα Β – Μονωτήρες LSR- SIR

Το φάσμα απορρόφησης υπερύθρου του μονωτήρα P02 (Σχήμα 4.68) είναι ενδεικτικό για τις μεταβολές στην σύνθεση του υλικού του πολυμερικού περιβλήματος για τους μονωτήρες της Ομάδας Β.



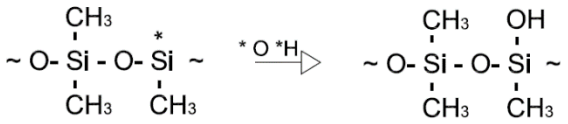
Σχήμα 4.69. Μονωτήρας P2, περιοχή υψηλή τάσης – Φάσμα απορρόφησης FTIR-ATR.

- Η απορρόφηση υπερύθρου στην περιοχή 3200-3700 cm^{-1}, που προέρχεται σε απορρόφηση εξαιτίας του δεσμού Si-OH, είναι σημαντικά αυξημένη για τα υλικά επιφανείας σε σχέση με το εσωτερικό υλικό του πολυμερικού περιβλήματος. Η μεταβολή αυτή μπορεί να εξηγηθεί από αντιδράσεις υδρόλυσης του πολυμερούς SIR.
- Οι απορροφήσεις υπερύθρου που προέρχονται από τον δεσμό $Si-CH_3$, περιοχή 1255-1270 cm^{-1}, στο υλικό επιφανείας είναι σημαντικά μειωμένη σε σχέση με την αντίστοιχη του εσωτερικού υλικού. Η μεταβολή αυτή μπορεί να εξηγηθεί από αντιδράσεις αποκοπής των ομάδων μεθυλίου από το πολυμερές SIR.
- Η απορρόφηση υπερύθρου που προέρχεται από τους δεσμούς -OH του H_2O, περιοχή 1601-1640 cm^{-1}, βρέθηκε αυξημένη στα υλικά επιφανείας σε σχέση με το εσωτερικό υλικό του πολυμερικού περιβλήματος. Αυτό δείχνει ότι τόσο τα στερεά υπολείμματα, προϊόντα καύσης και περιβαλλοντική ρύπανση, στο υλικό επιφανείας περιβλήματος απορροφούν υγρασία.

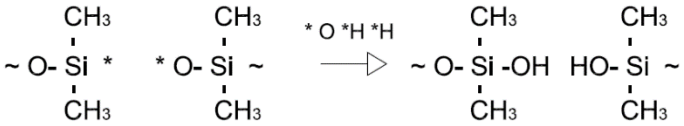
Συνοψίζοντας, εντοπίστηκαν μεταβολές στην μοριακή δομή του πολυμερικού περιβλήματος των μονωτήρων. Οι μεταβολές σχετίζονται με:

•Σχηματισμό ομάδων σιλανόλης, που προέρχονται από τις ακόλουθες χημικές αντιδράσεις στο πολυμερές σιλικόνης [22].

Σχηματισμός ομάδων σιλανόλης (α)

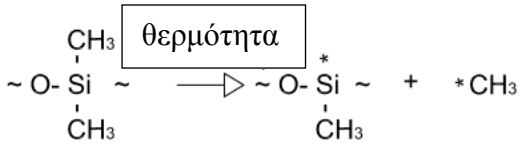


Σχηματισμός ομάδων σιλανόλης (β)



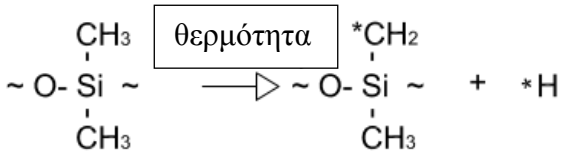
•διάσπαση του δεσμού Si-C, που μπορεί να προέλθει από την ακόλουθη χημική αντίδραση στο πολυμερές σιλικόνης [22]

Διάσπαση δεσμού Si-C

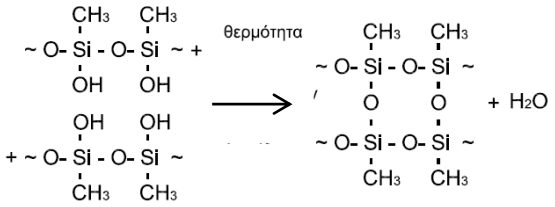


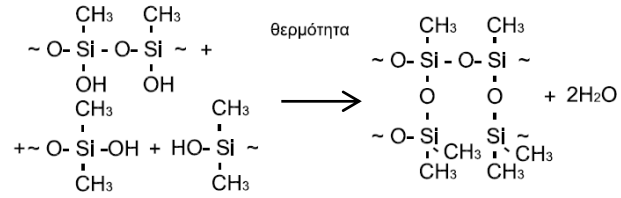
•διάσπαση του δεσμού C-H, που μπορεί να προέλθει από την ακόλουθη χημική αντίδραση στο πολυμερές σιλικόνης [22]

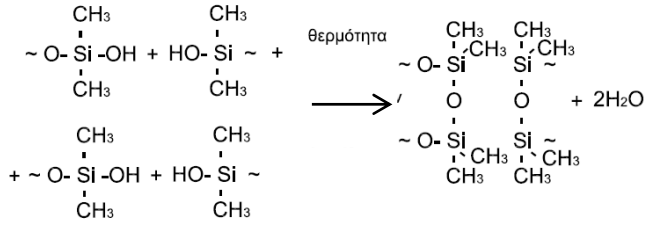
Διάσπαση δεσμού C-H



•σχηματισμός μορίων νερού, μέσω αντιδράσεων υδρόλυσης του πολυμερούς σιλικόνης [22]







•σχηματισμός μορίων νερού, μέσω αφυδάτωσης της ένυδρης αλουμίνας

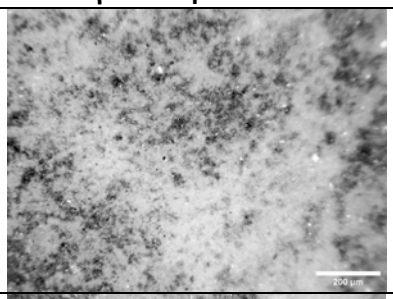
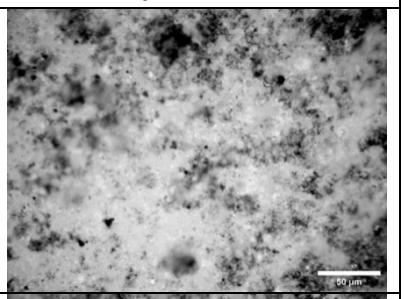
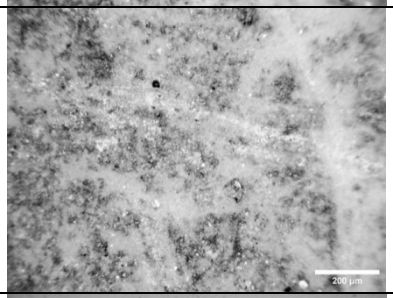
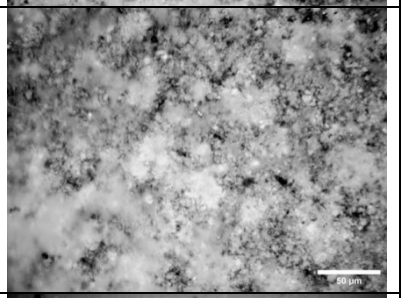
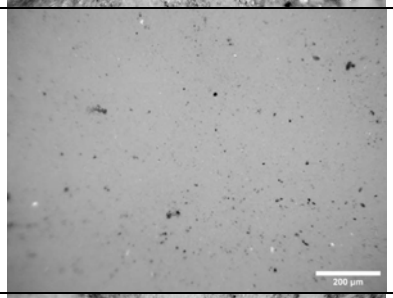
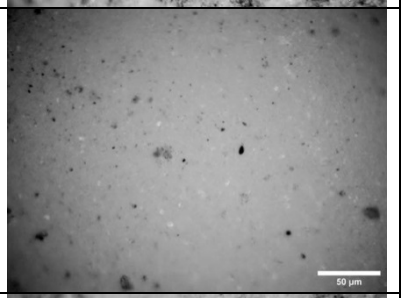
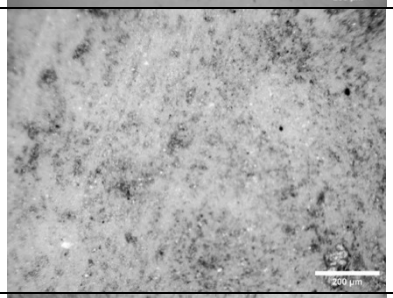
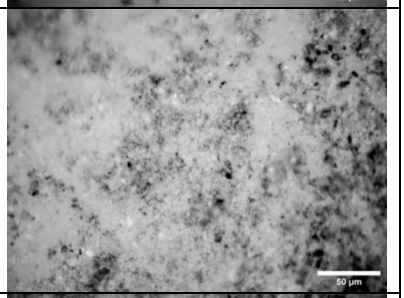
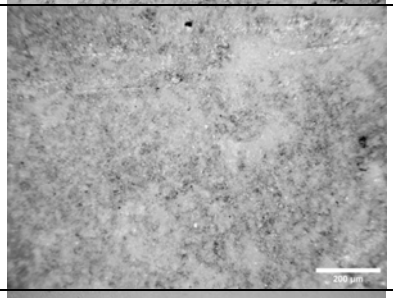
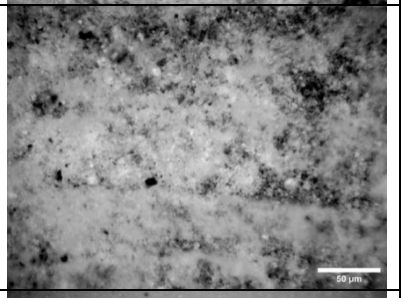
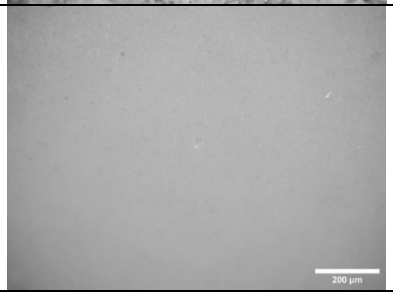
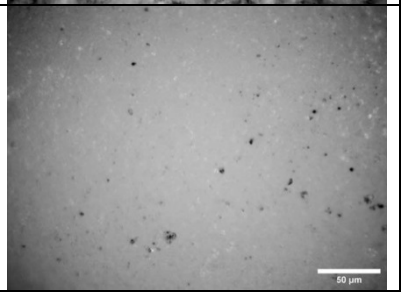
$$Al_2O_3\ 3H_2O \rightarrow Al_2O_3 + 3H_2O$$

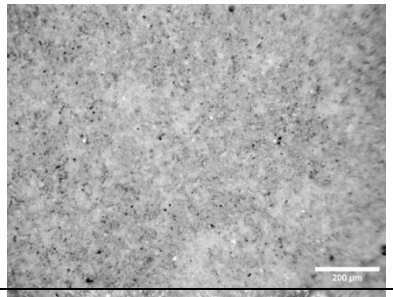
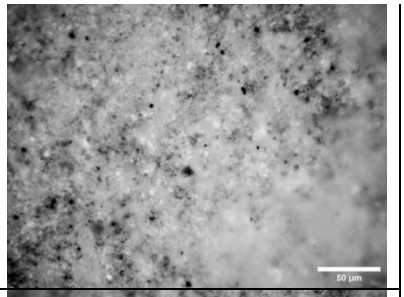
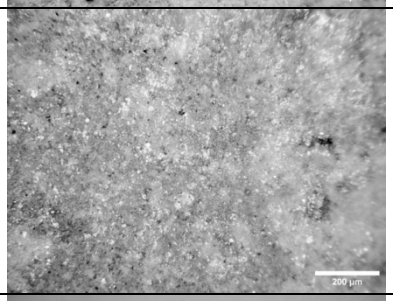
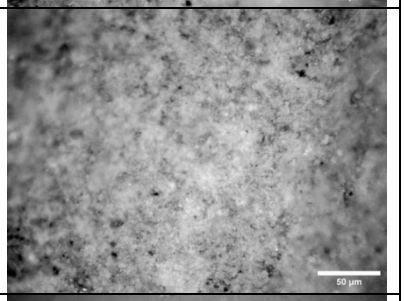
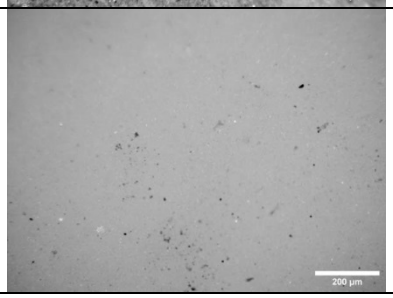
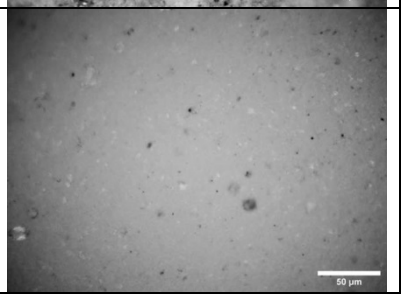
4.3.4 Ανάλυση οπτικής μικροσκοπίας

Οι μορφολογικές αλλοιώσεις του υλικού επιφανείας του πολυμερικού περιβλήματος των μονωτήρων διερευνήθηκαν, πέραν της οπτικής επιθεώρησης (Ενότητα 1.3.1), μέσω μετρήσεων οπτικής μικροσκοπίας.

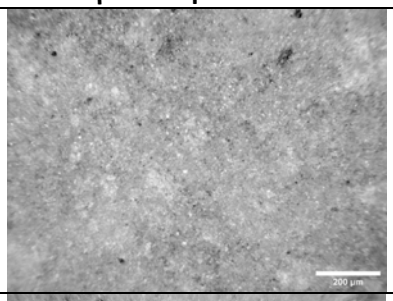
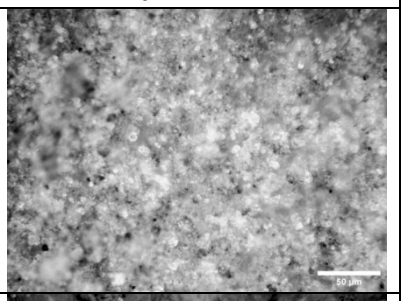
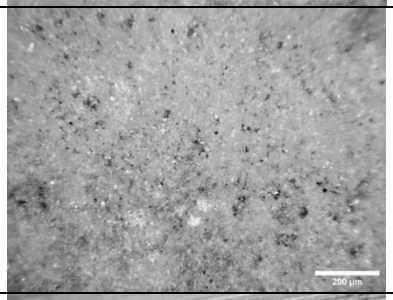
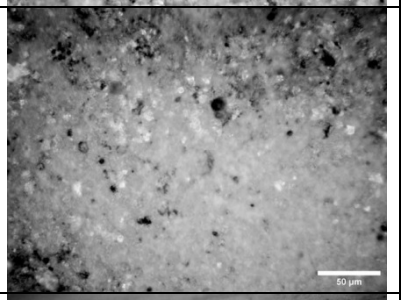
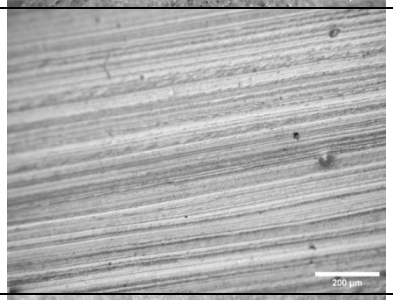
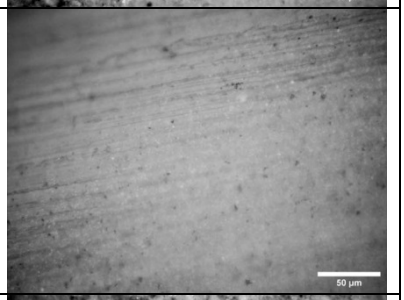
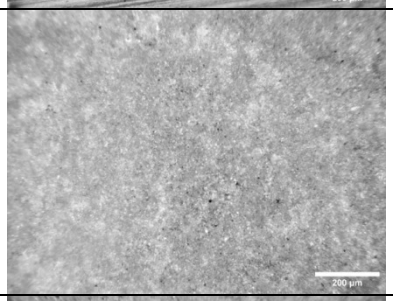
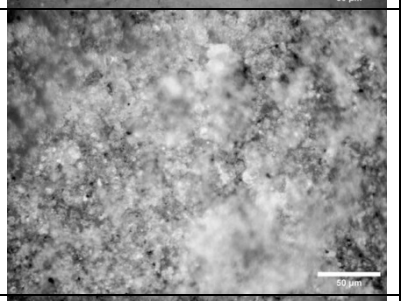
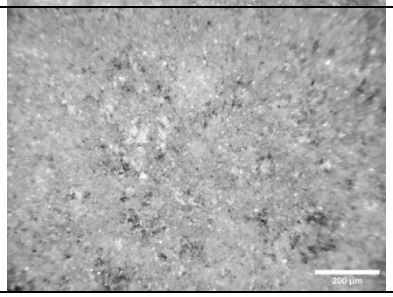
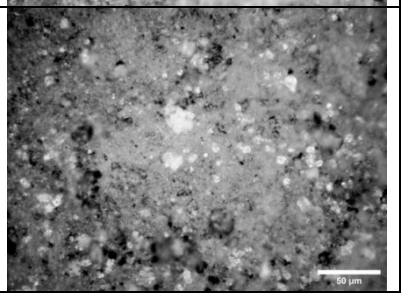
Στις ακόλουθες υποενότητες (1.3.4.1-1.3.4.18) παρουσιάζονται χαρακτηριστικές εικόνες τόσο του εσωτερικού υλικού όσο και του υλικού επιφανείας (άνω και κάτω πλευρά) του πολυμερικού περιβλήματος των μονωτήρων. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν για και για τις τρεις περιοχές του πολυμερικού περιβλήματος (ground, middle, h.v.).

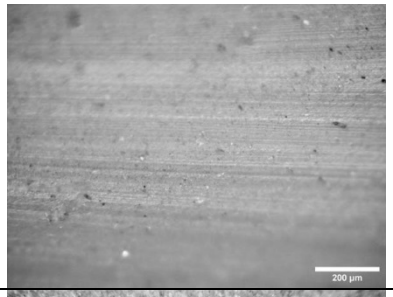
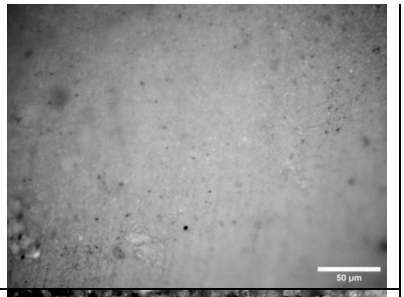
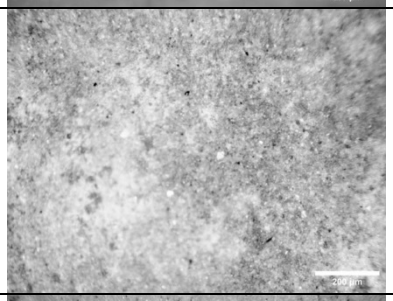
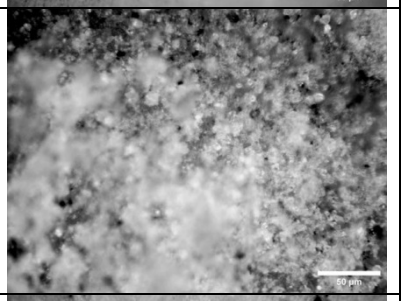
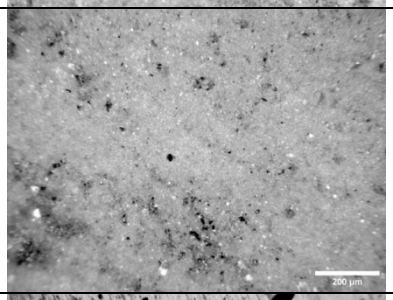
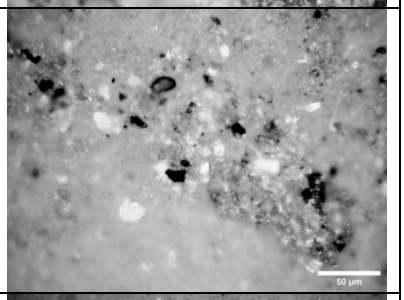
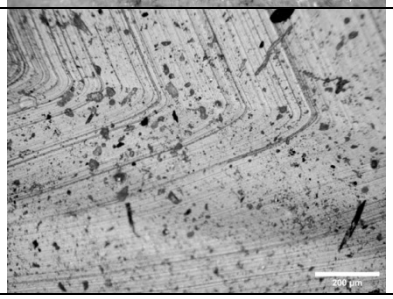
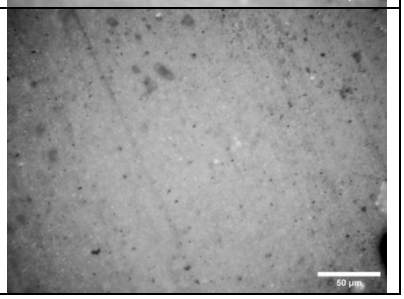
4.3.4.1 Μονωτήρας P1

Πλευρά	Μεγέθυνση x10	Μεγέθυνση x40
HV Top		
HV Bottom		
HV Bulk		
Middle Top		
Middle Bottom		
Middle Bulk		

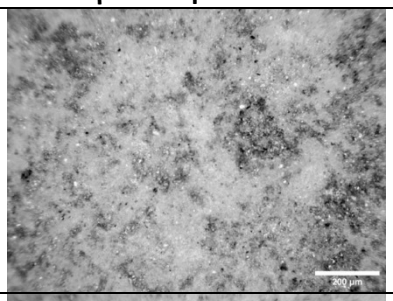
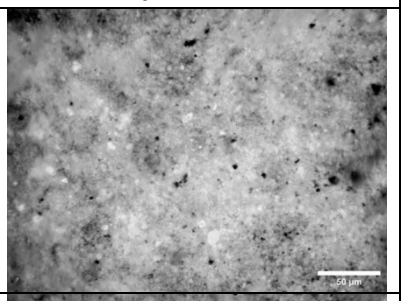
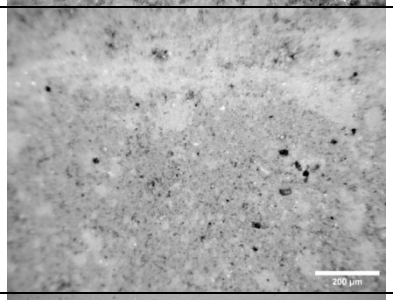
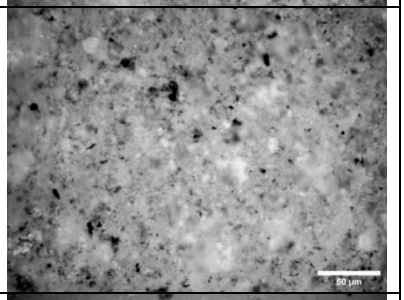
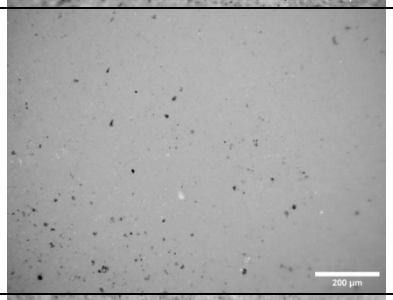
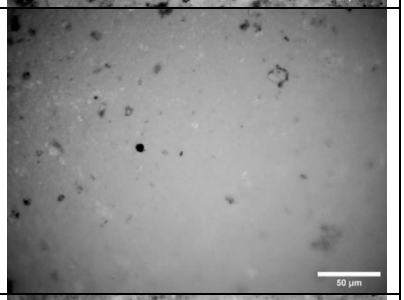
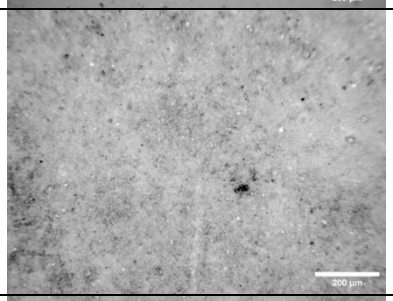
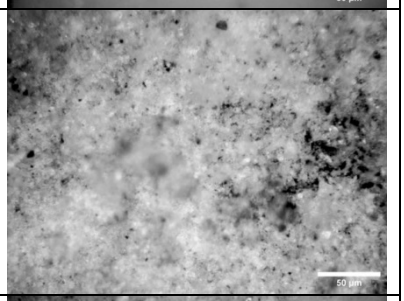
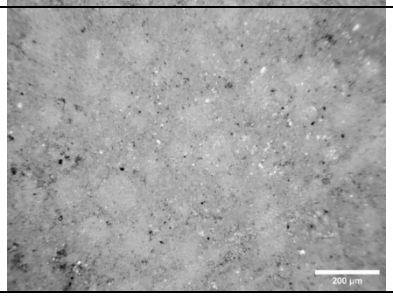
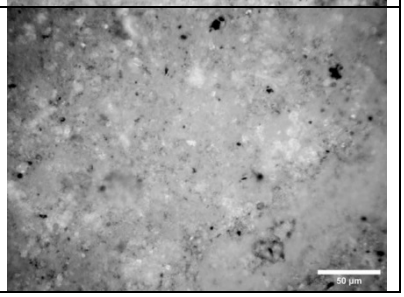
Ground Top			
Ground Bottom			
Ground Bulk			

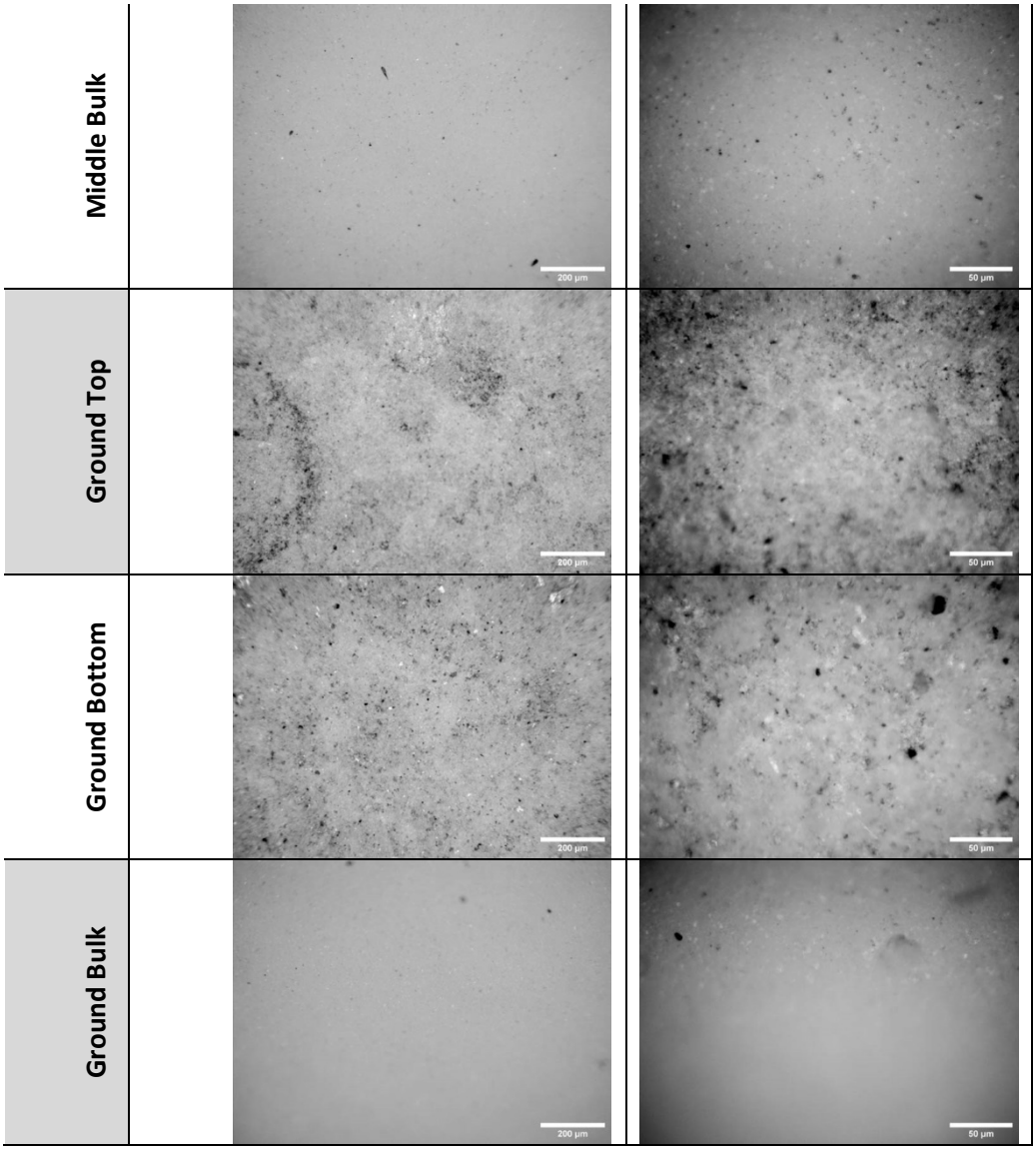
4.3.4.2 Μονωτήρας P2

Πλευρά	Μεγέθυνση x10	Μεγέθυνση x40
HV Top		
HV Bottom		
HV Bulk		
Middle Top		
Middle Bottom		

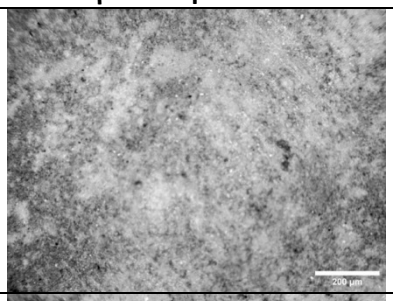
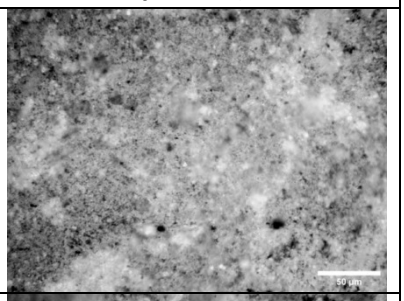
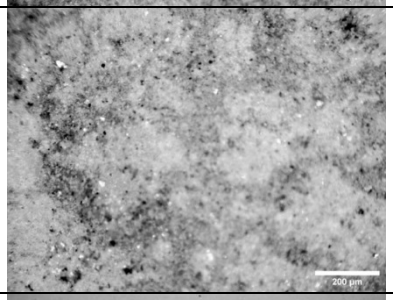
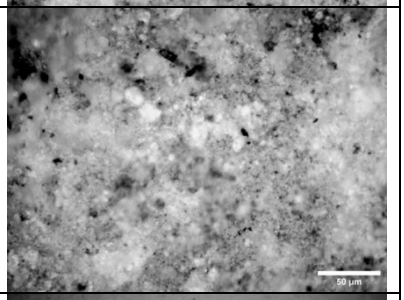
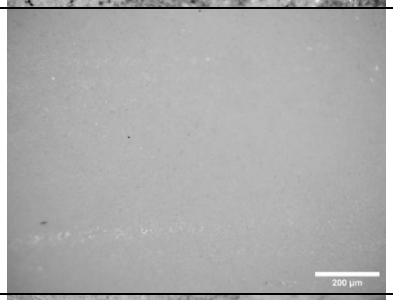
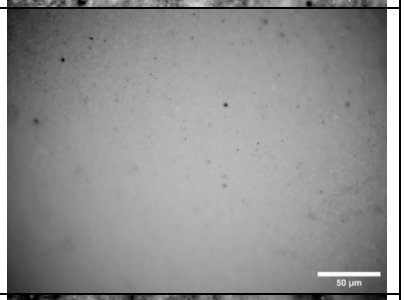
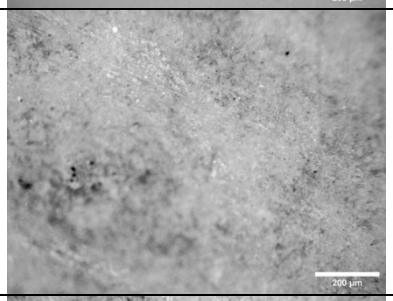
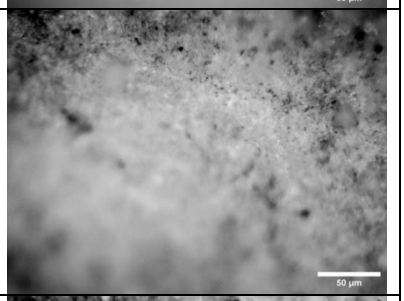
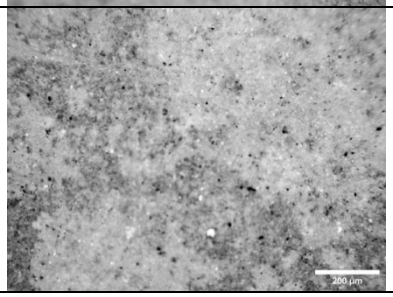
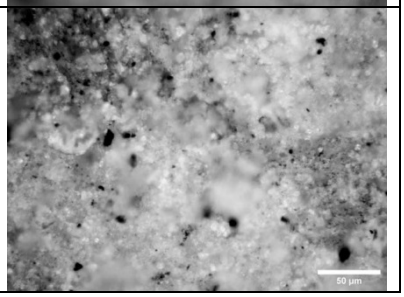
Middle Bulk			
Ground Top			
Ground Bottom			
Ground Bulk			

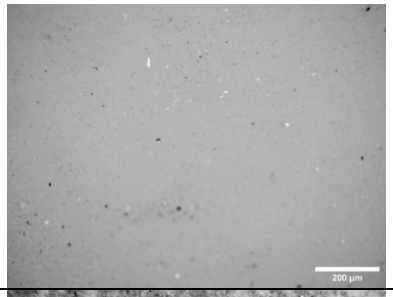
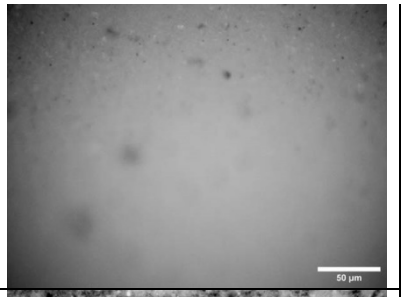
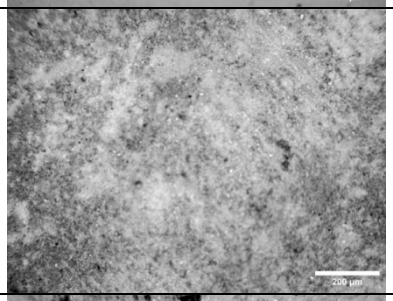
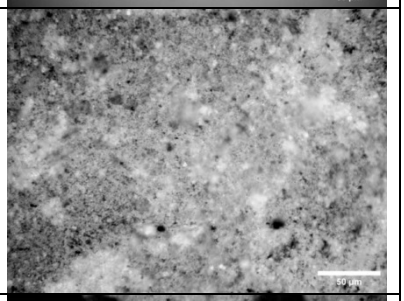
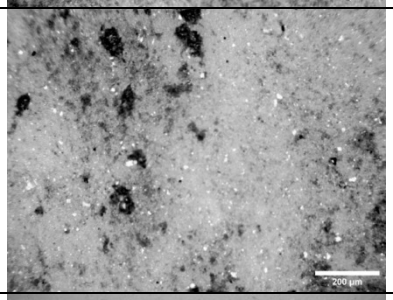
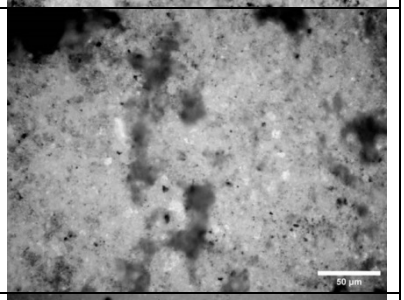
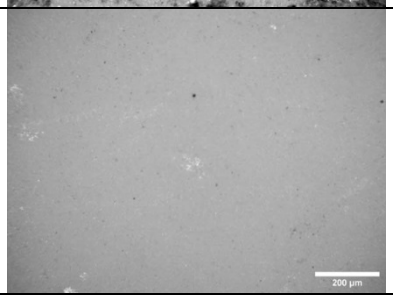
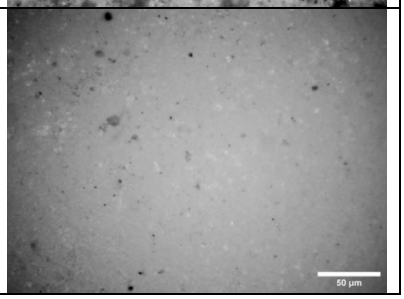
4.3.4.3 Μονωτήρας P3

Πλευρά	Μεγέθυνση x10	Μεγέθυνση x40
HV Top		
HV Bottom		
HV Bulk		
Middle Top		
Middle Bottom		

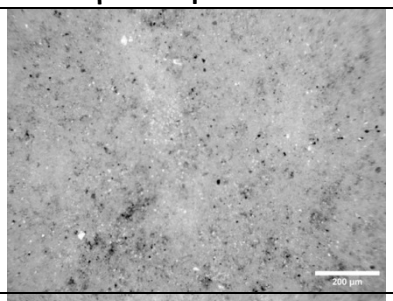
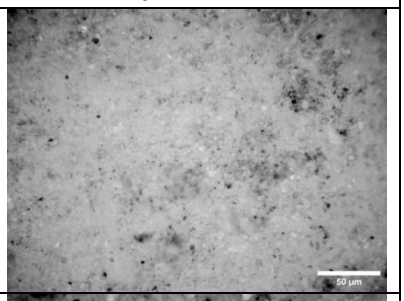
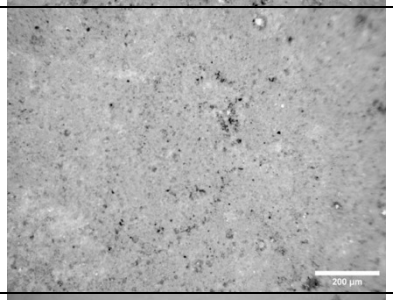
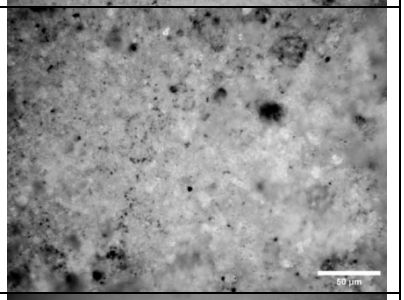
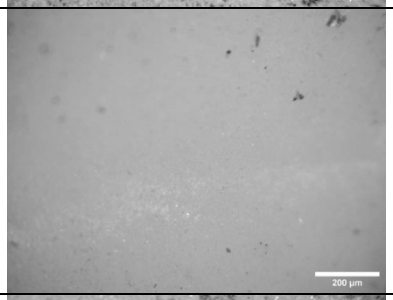
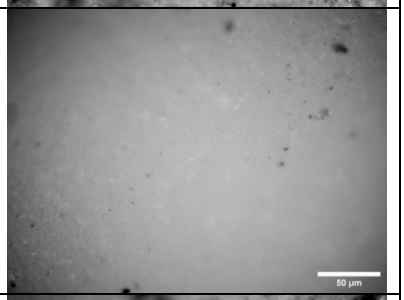
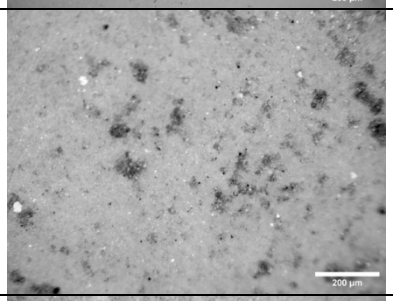
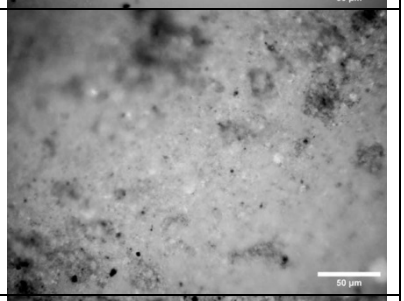
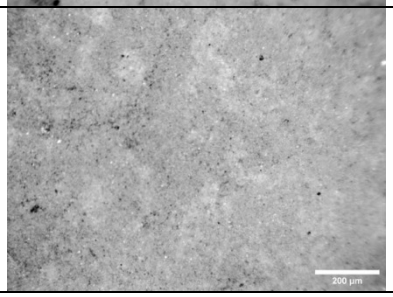
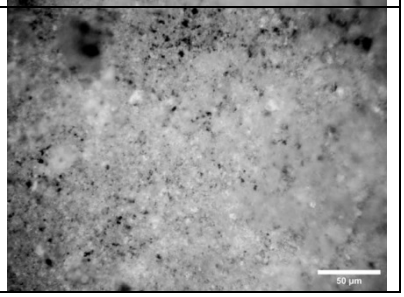

Middle Bulk
Ground Top
Ground Bottom
Ground Bulk
200 µm
50 µm

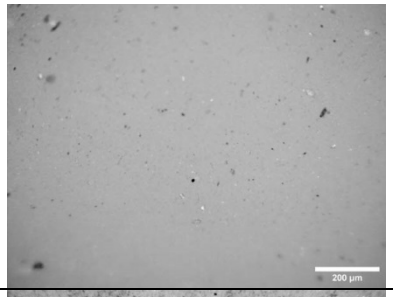
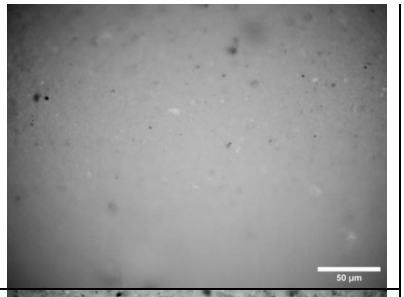
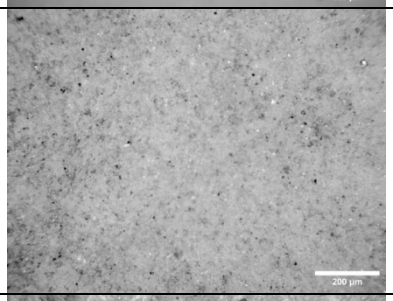
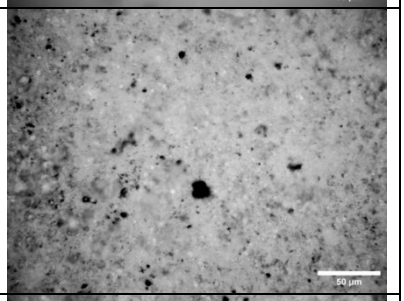
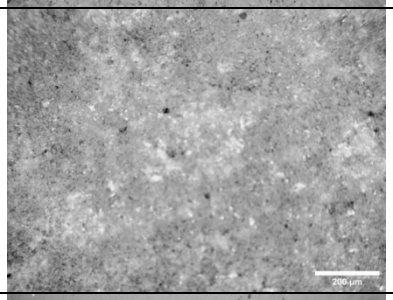
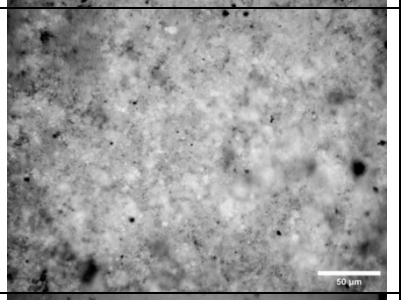
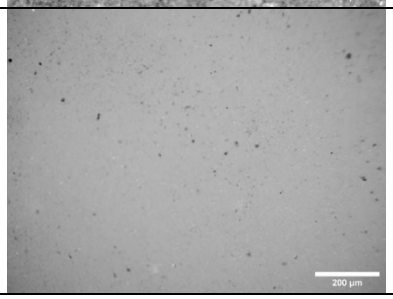
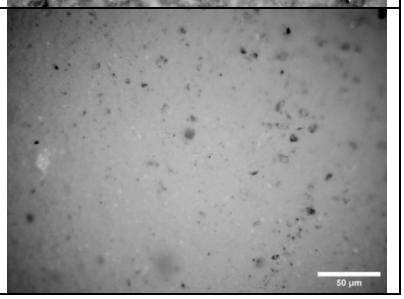
4.3.4.4 Μονωτήρας P4

Πλευρά	Μεγέθυνση x10	Μεγέθυνση x40
HV Top		
HV Bottom		
HV Bulk		
Middle Top		
Middle Bottom		

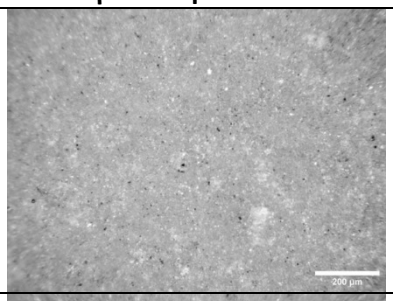
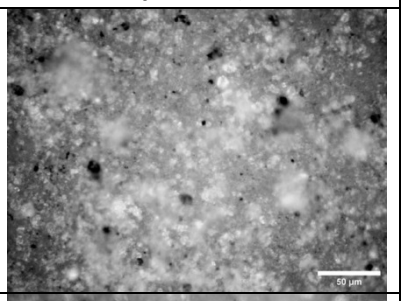
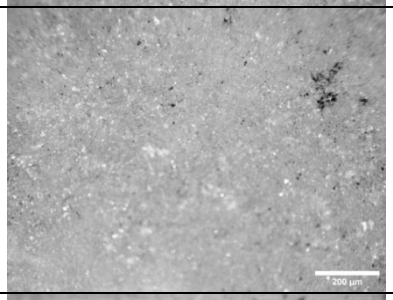
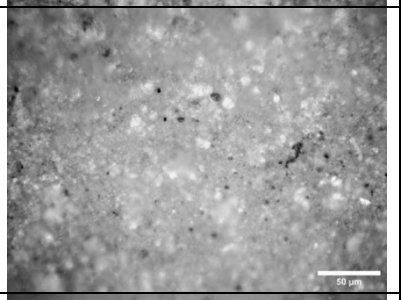
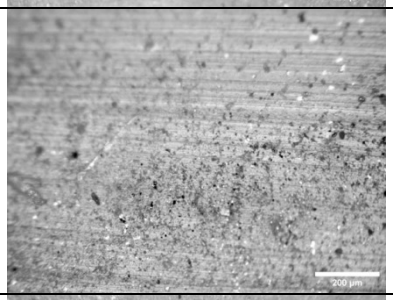
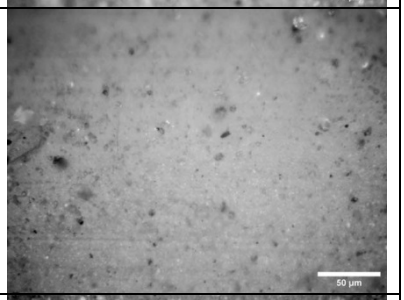
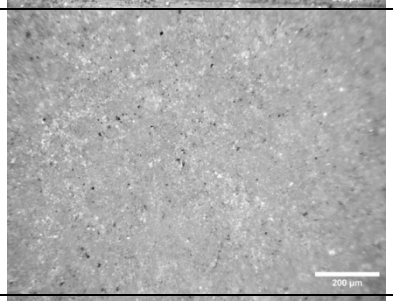
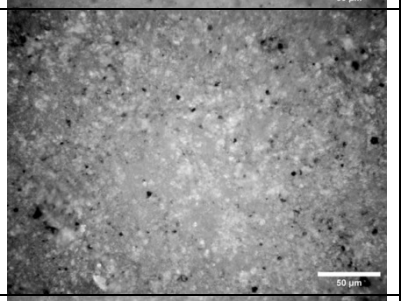
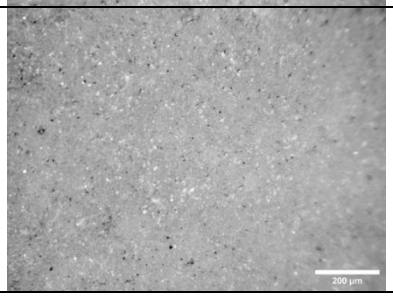
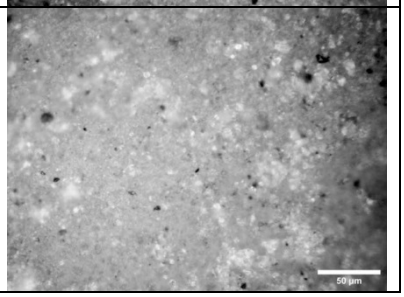
Middle Bulk			
Ground Top			
Ground Bottom			
Ground Bulk			

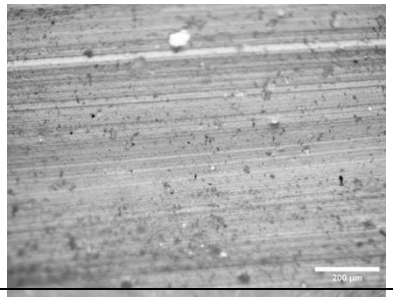
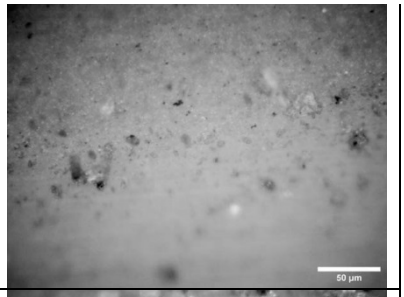
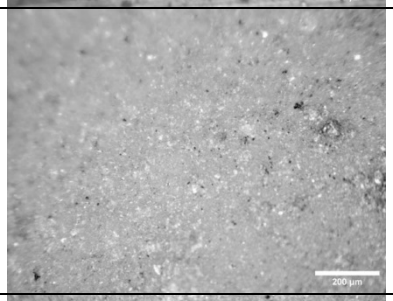
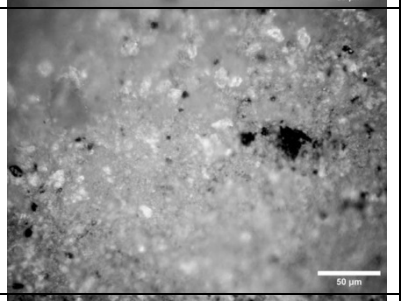
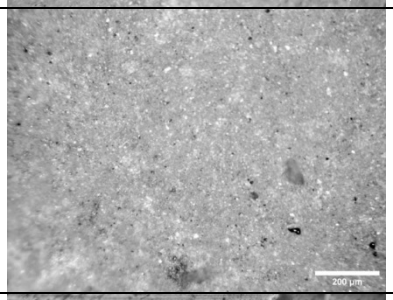
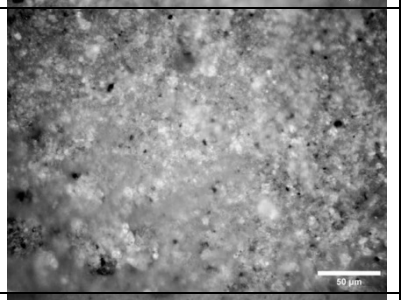
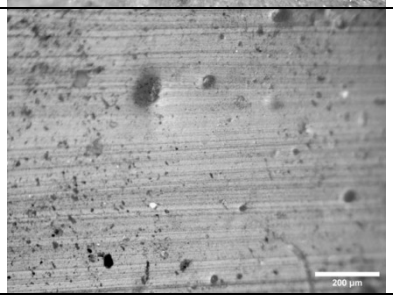
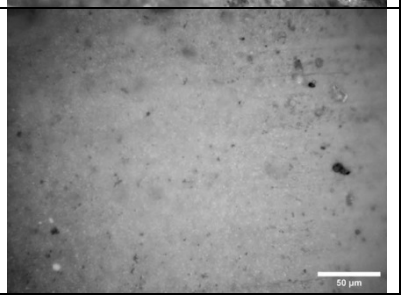
4.3.4.5 Μονωτήρας P5

Πλευρά	Μεγέθυνση x10	Μεγέθυνση x40
HV Top		
HV Bottom		
HV Bulk		
Middle Top		
Middle Bottom		

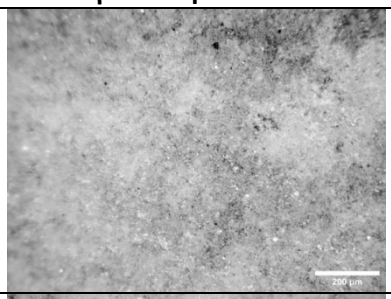
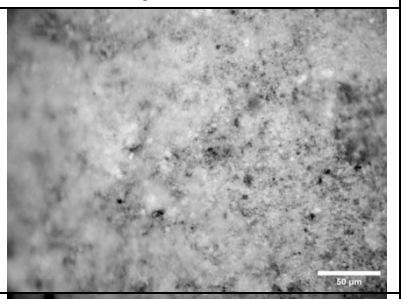
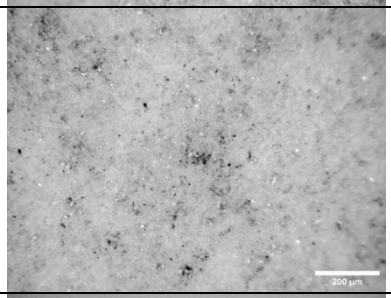
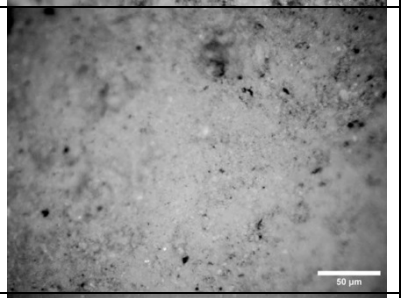
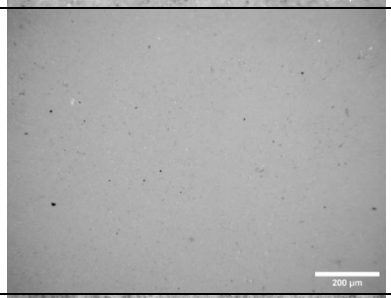
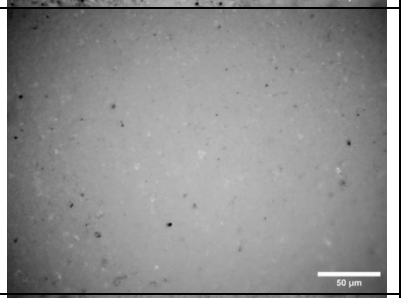
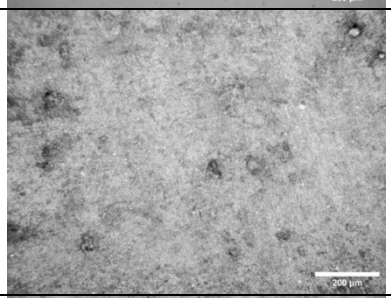
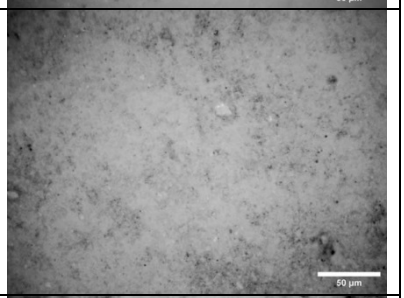
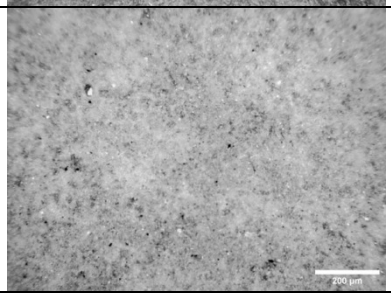
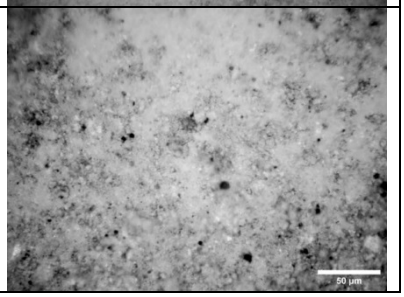
Middle Bulk			
Ground Top			
Ground Bottom			
Ground Bulk			

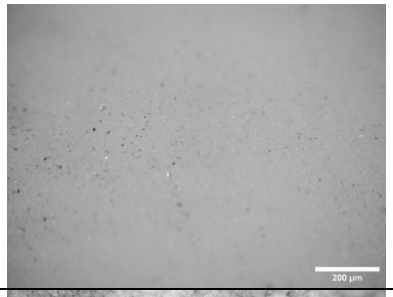
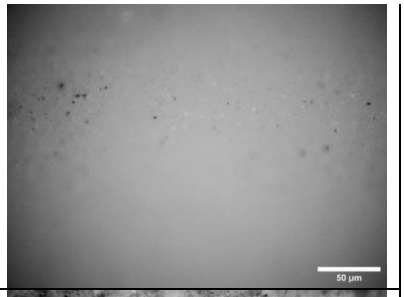
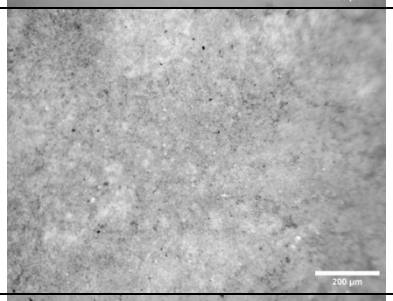
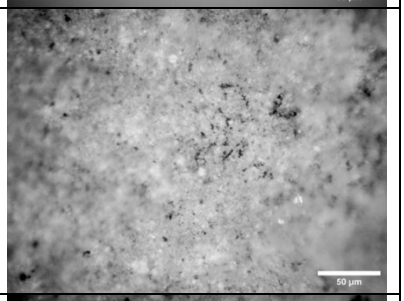
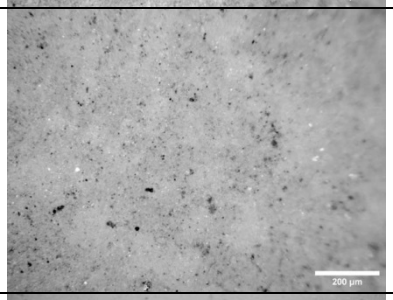
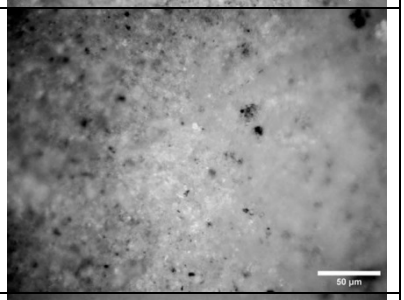
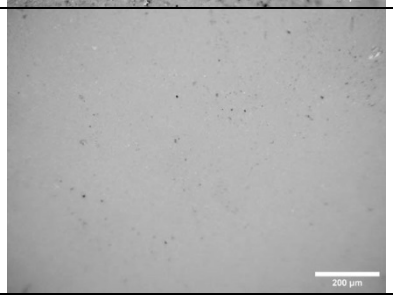
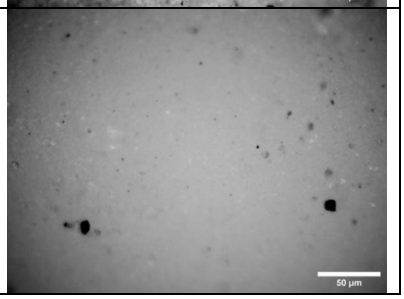
4.3.4.6 Μονωτήρας P6

Πλευρά	Μεγέθυνση x10	Μεγέθυνση x40
HV Top		
HV Bottom		
HV Bulk		
Middle Top		
Middle Bottom		

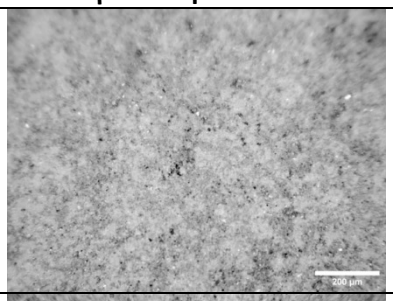
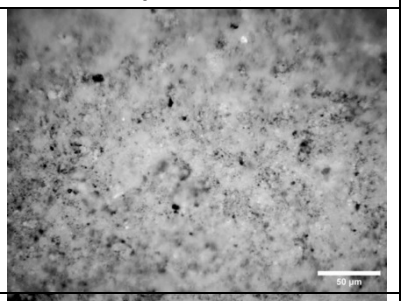
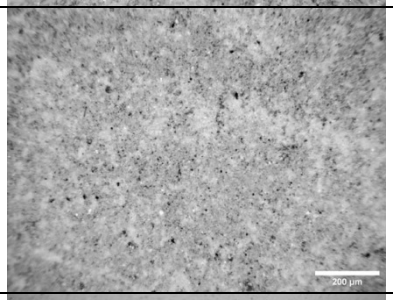
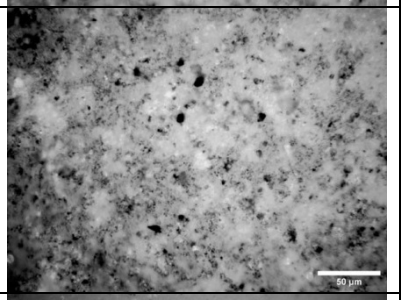
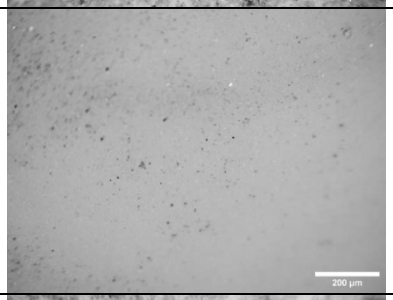
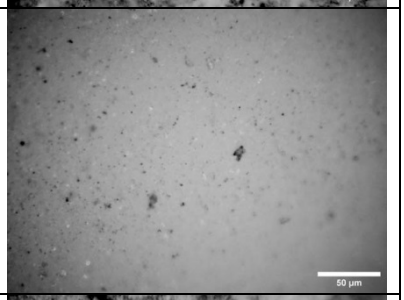
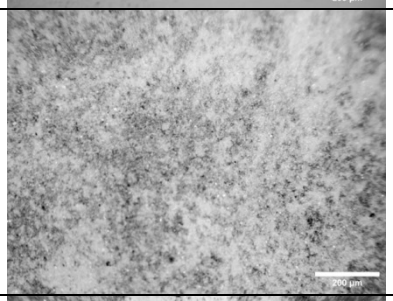
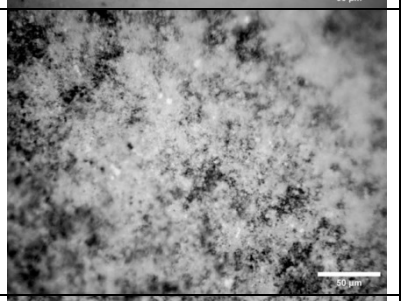
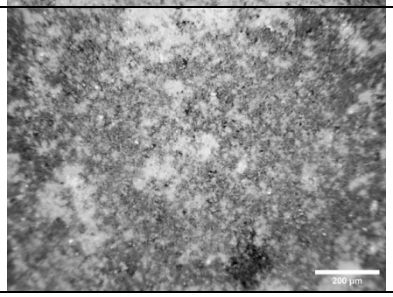
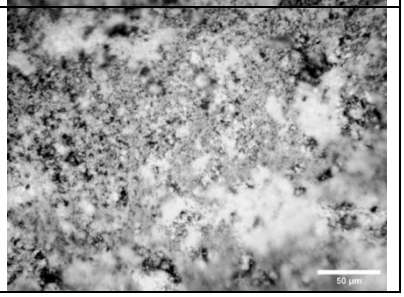
Middle Bulk			
Ground Top			
Ground Bottom			
Ground Bulk			

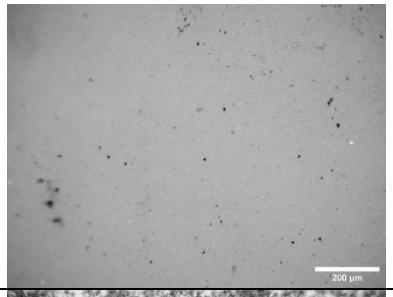
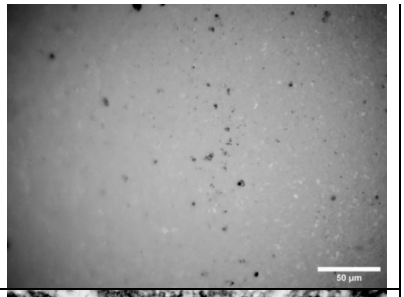
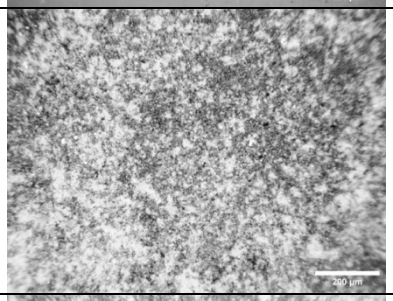
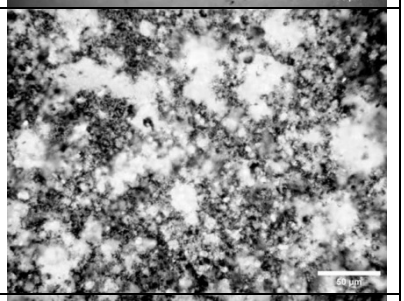
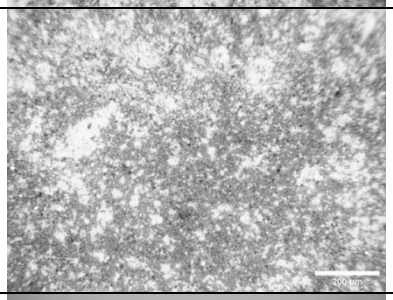
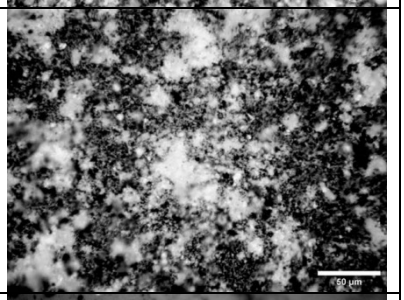
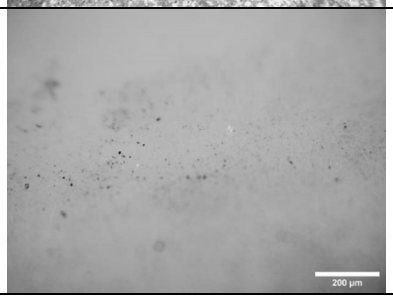
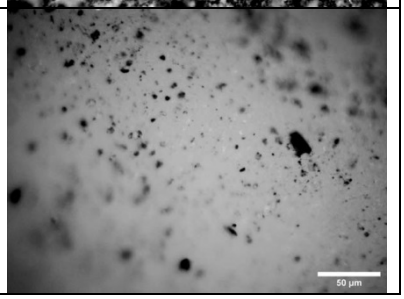
4.3.4.7 Μονωτήρας P7

Πλευρά	Μεγέθυνση x10	Μεγέθυνση x40
HV Top		
HV Bottom		
HV Bulk		
Middle Top		
Middle Bottom		

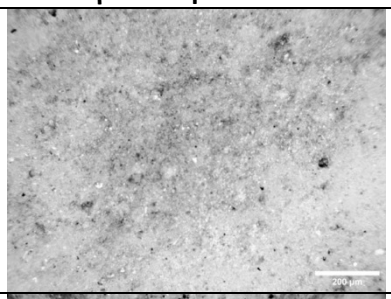
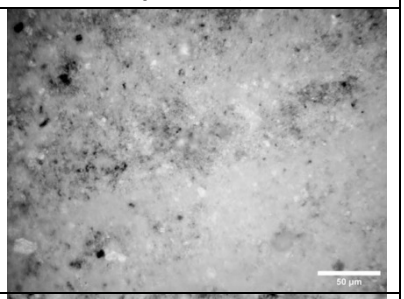
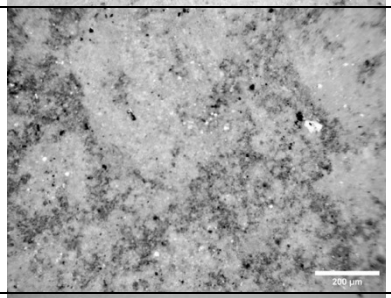
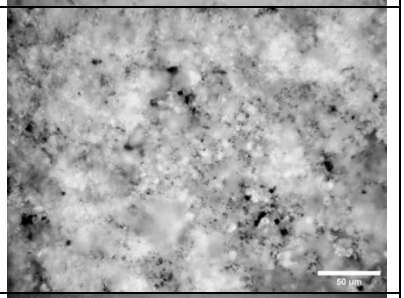
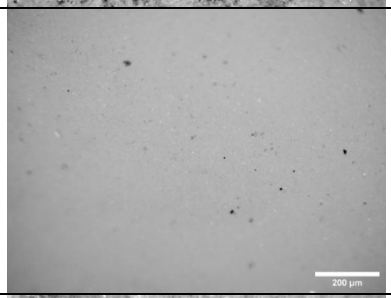
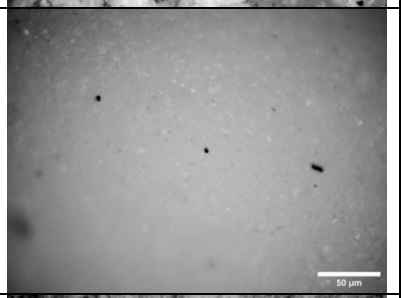
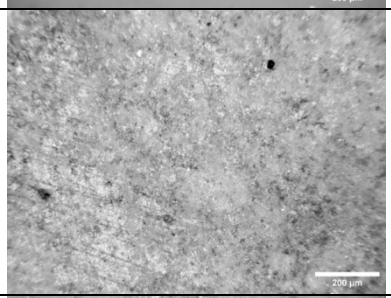
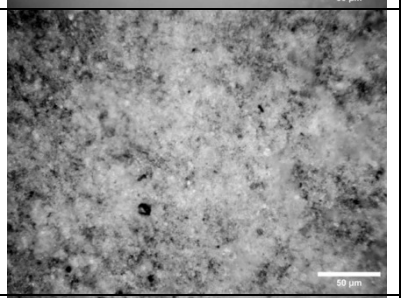
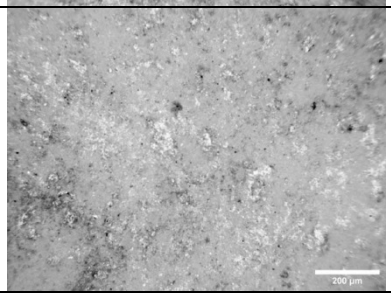
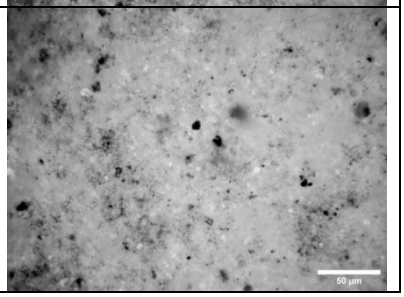
Middle Bulk			
Ground Top			
Ground Bottom			
Ground Bulk			

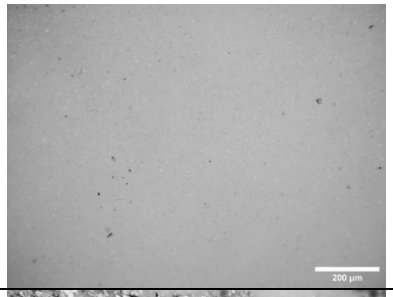
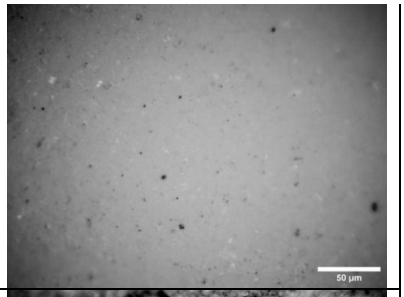
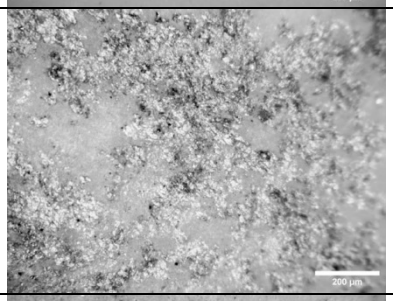
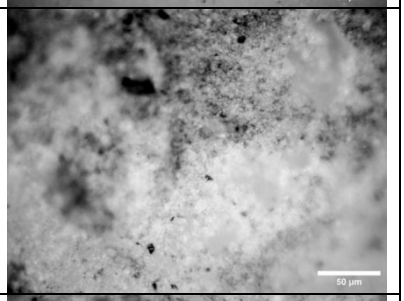
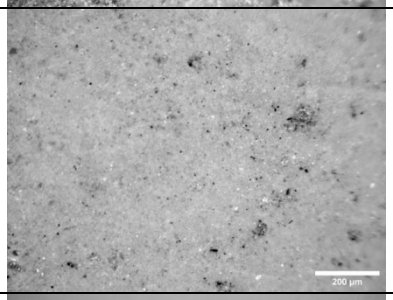
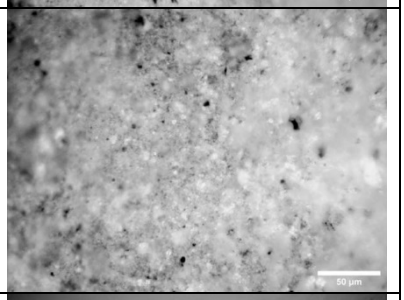
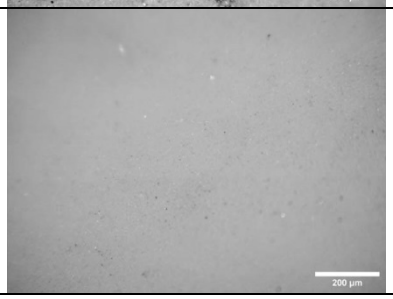
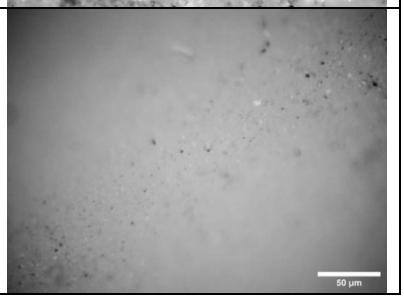
4.3.4.8 Μονωτήρας P8

Πλευρά	Μεγέθυνση x10	Μεγέθυνση x40
HV Top		
HV Bottom		
HV Bulk		
Middle Top		
Middle Bottom		

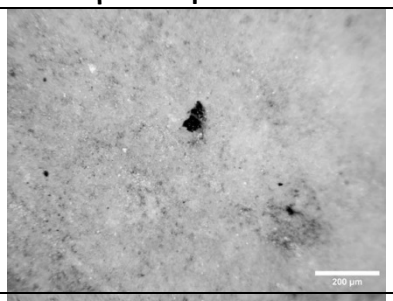
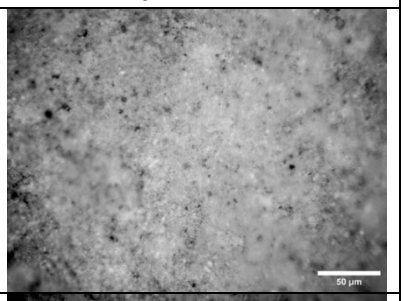
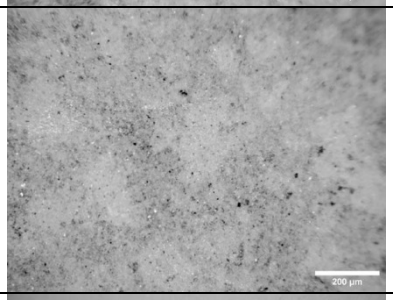
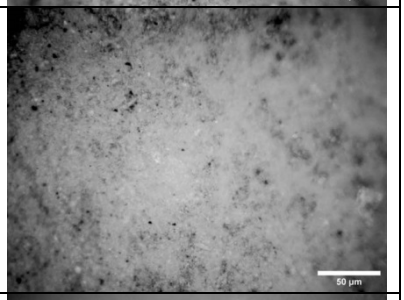
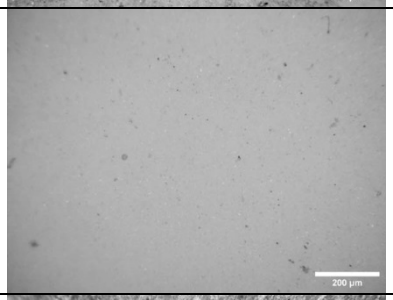
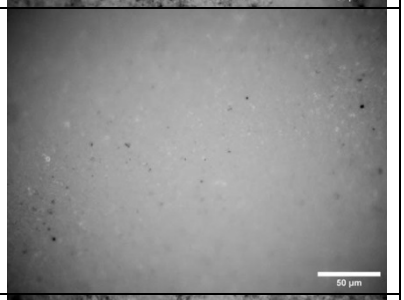
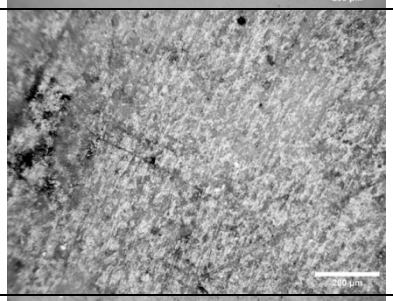
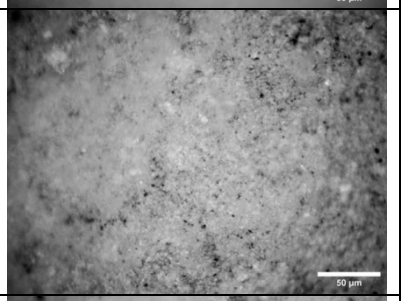
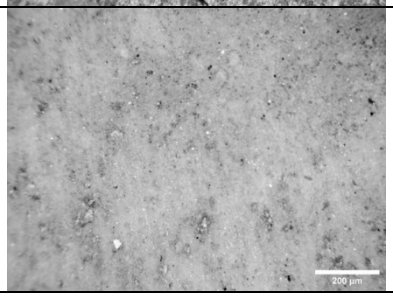
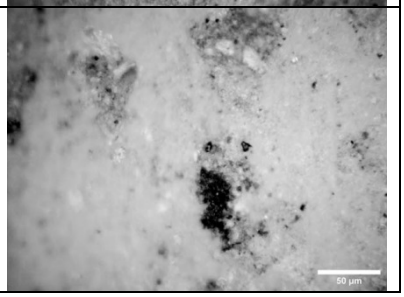
Middle Bulk			
Ground Top			
Ground Bottom			
Ground Bulk			

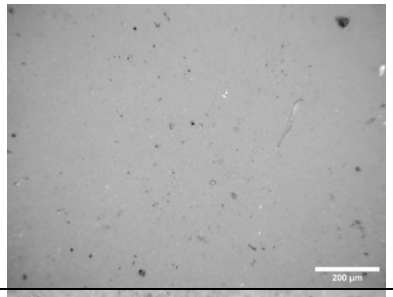
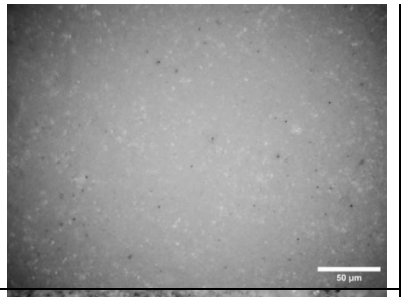
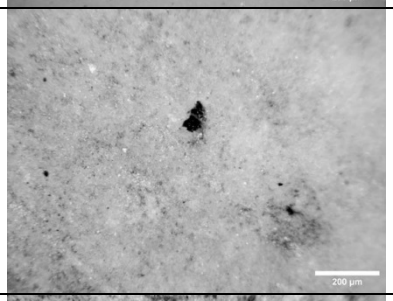
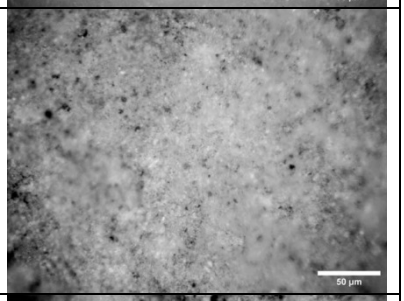
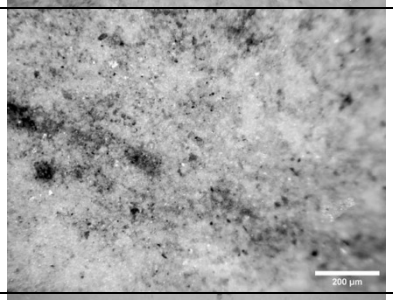
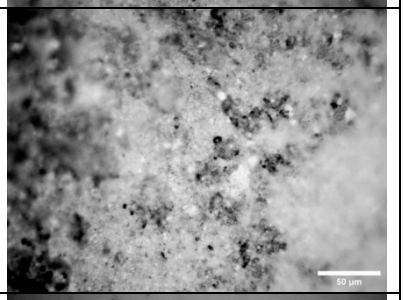
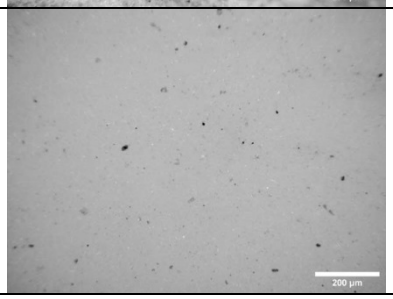
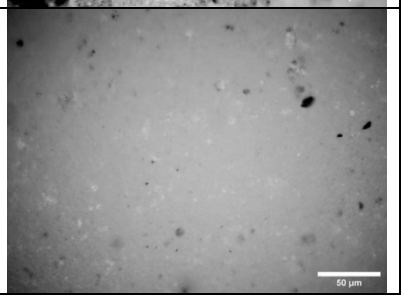
4.3.4.9 Μονωτήρας P9

Πλευρά	Μεγέθυνση x10	Μεγέθυνση x40
HV Top		
HV Bottom		
HV Bulk		
Middle Top		
Middle Bottom		

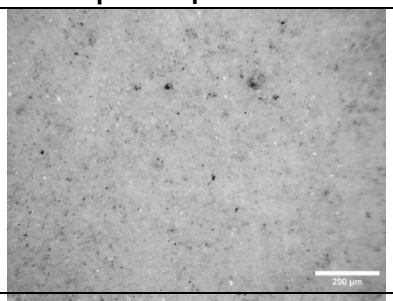
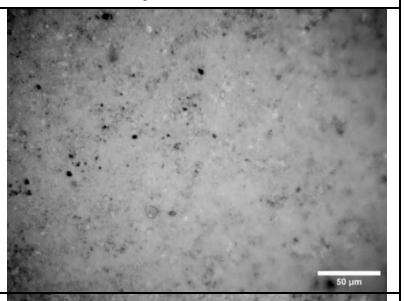
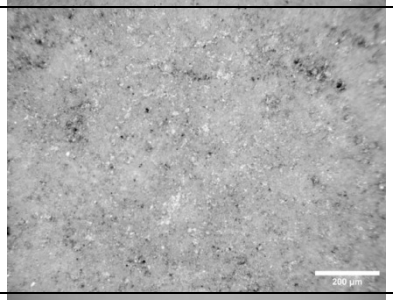
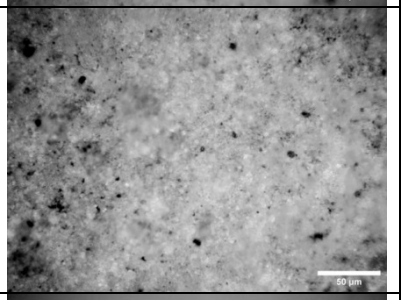
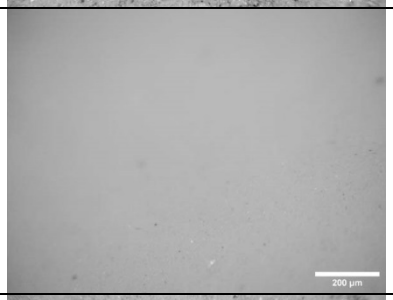
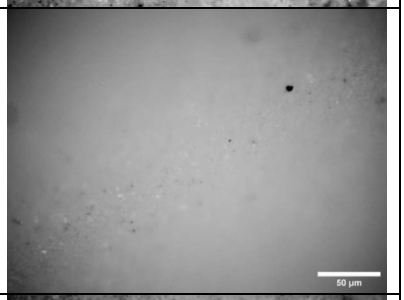
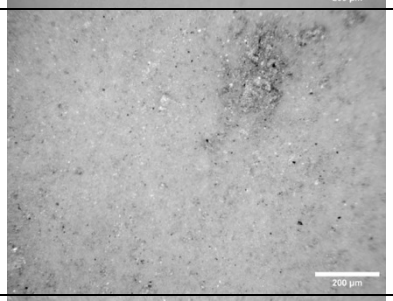
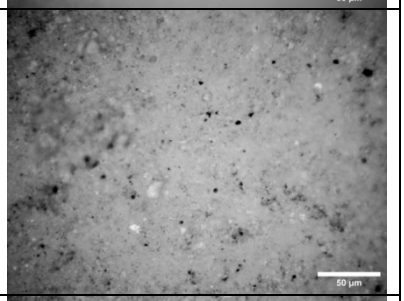
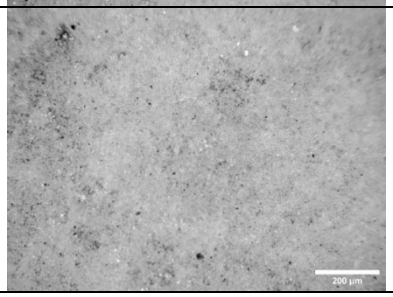
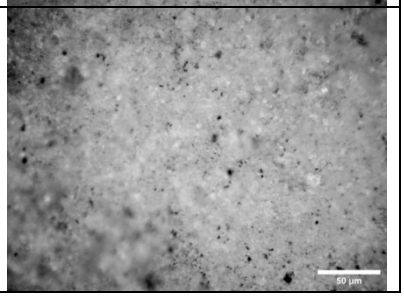
Middle Bulk			
Ground Top			
Ground Bottom			
Ground Bulk			

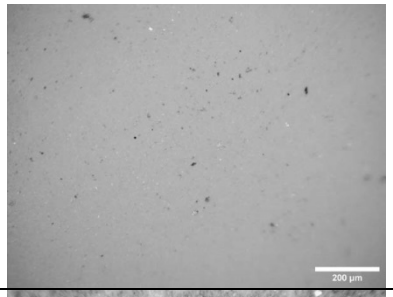
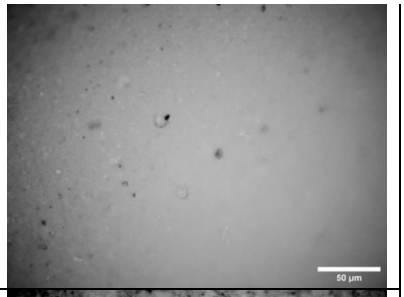
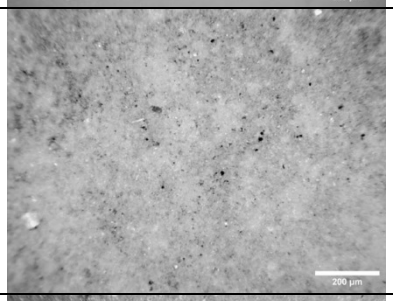
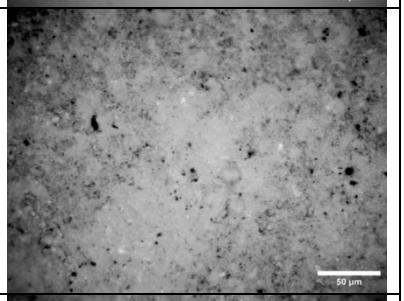
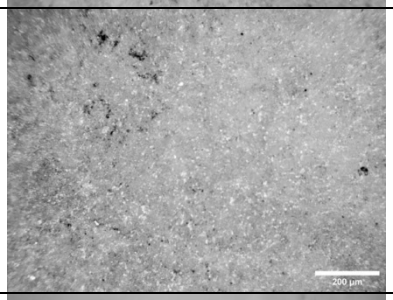
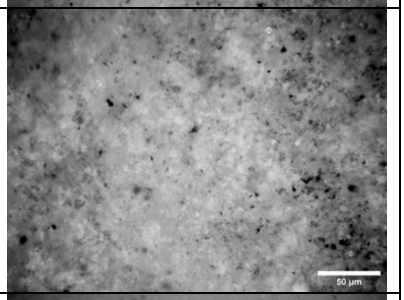
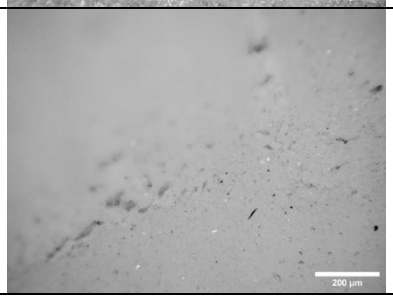
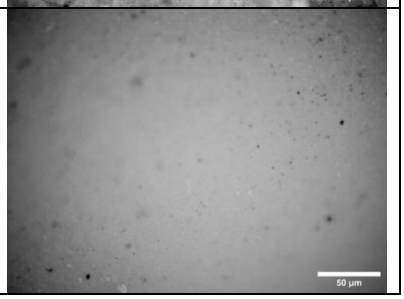
4.3.4.10Μονωτήρας P10

Πλευρά	Μεγέθυνση x10	Μεγέθυνση x40
HV Top		
HV Bottom		
HV Bulk		
Middle Top		
Middle Bottom		

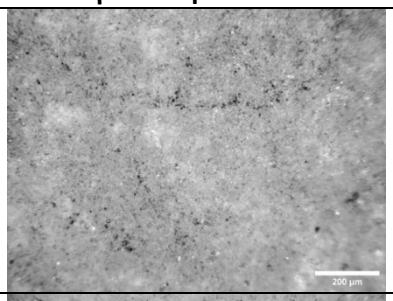
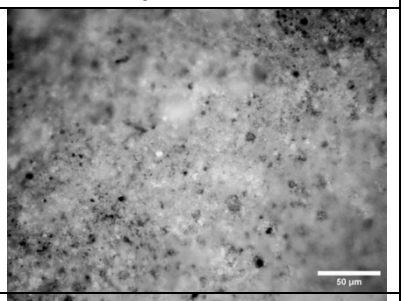
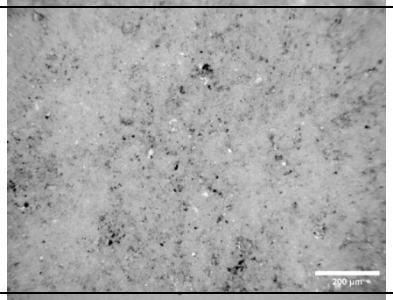
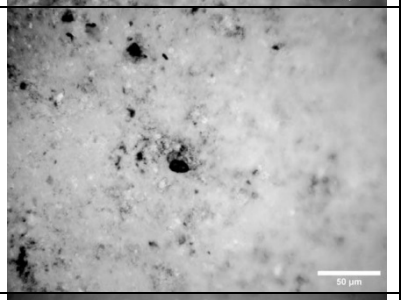
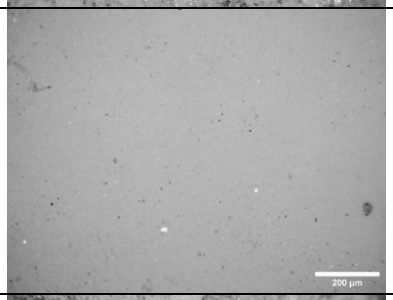
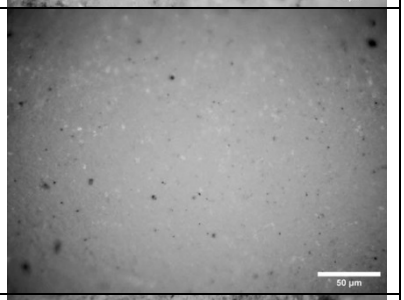
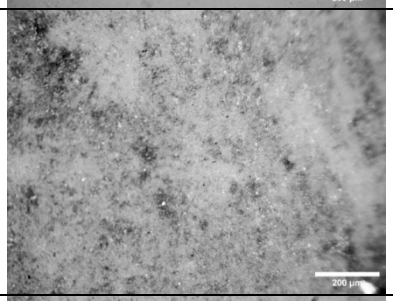
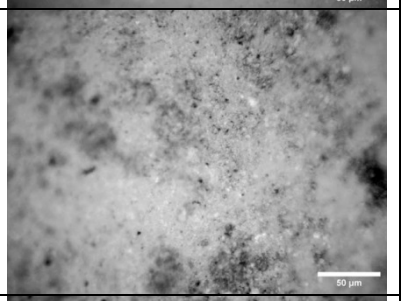
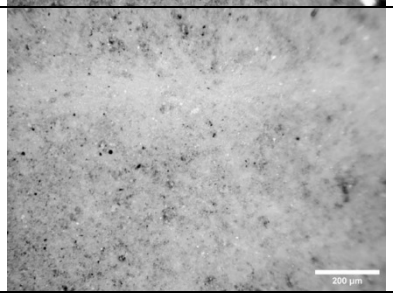
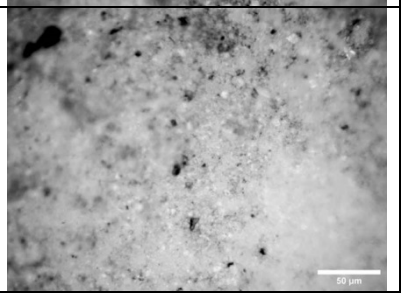
Middle Bulk			
Ground Top			
Ground Bottom			
Ground Bulk			

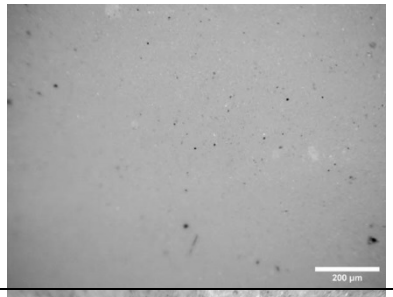
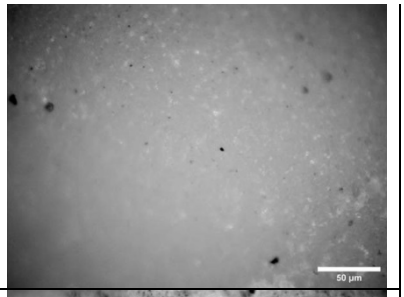
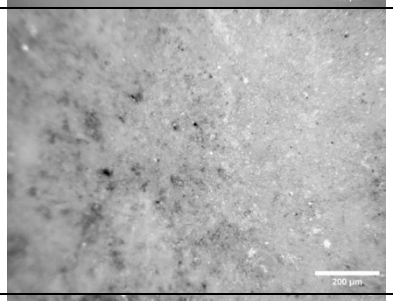
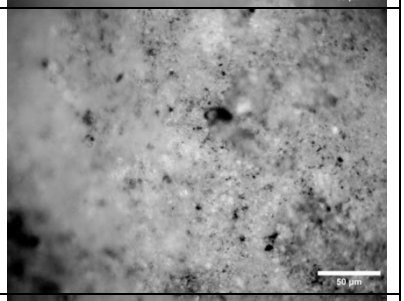
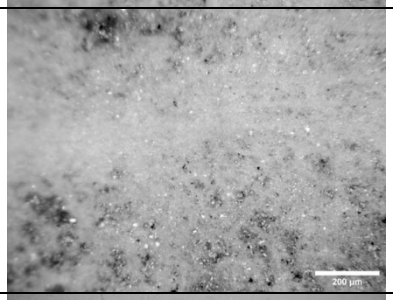
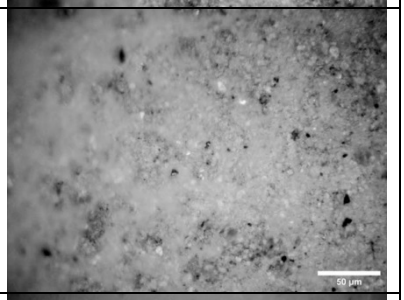
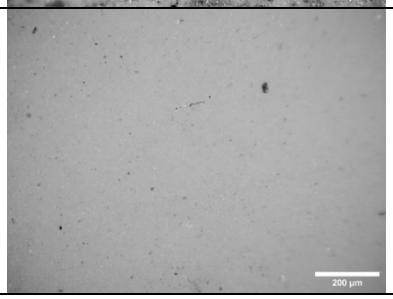
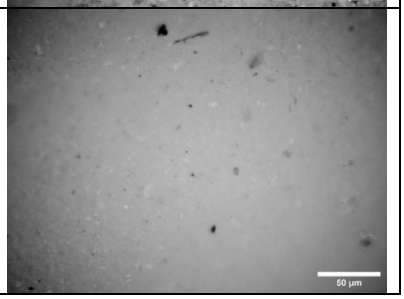
4.3.4.11 Μονωτήρας P11

Πλευρά	Μεγέθυνση x10	Μεγέθυνση x40
HV Top		
HV Bottom		
HV Bulk		
Middle Top		
Middle Bottom		

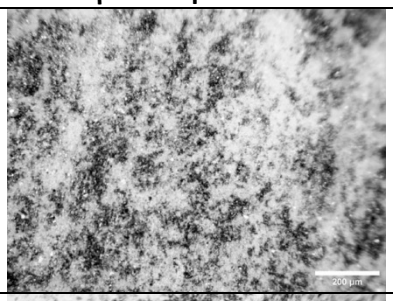
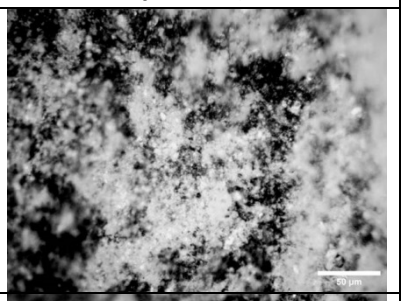
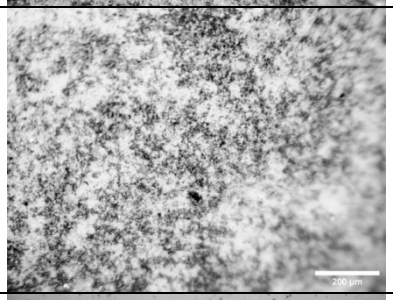
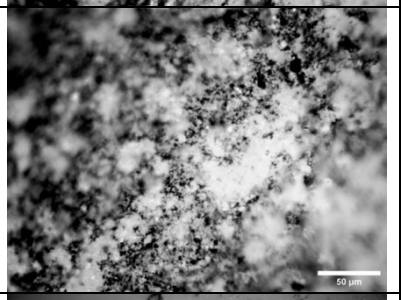
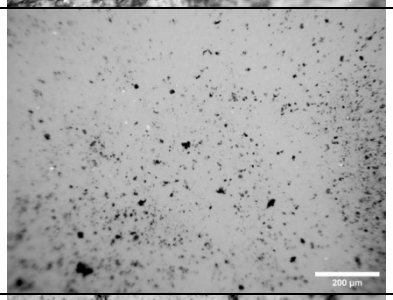
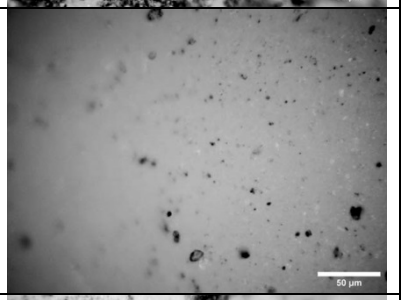
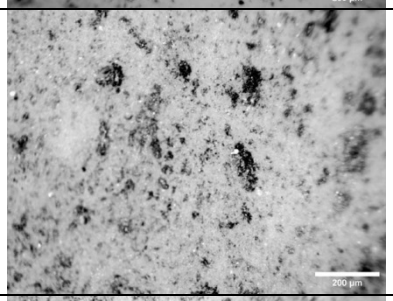
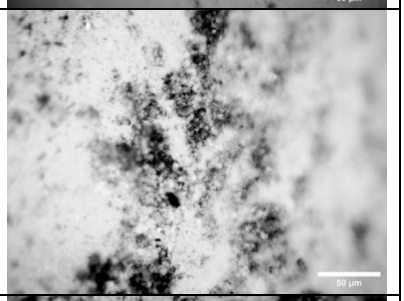
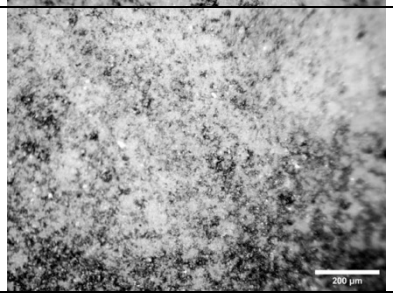
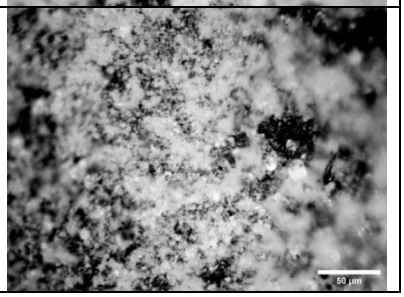
Middle Bulk			
Ground Top			
Ground Bottom			
Ground Bulk			

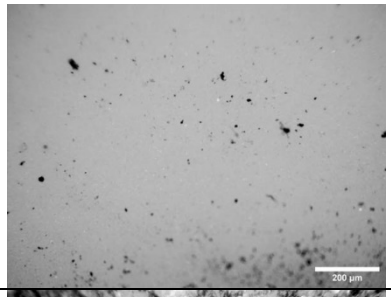
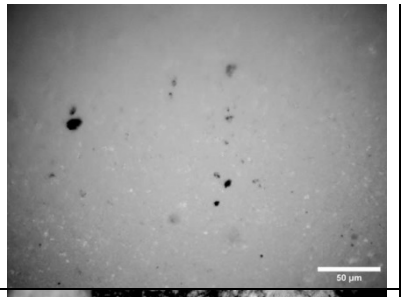
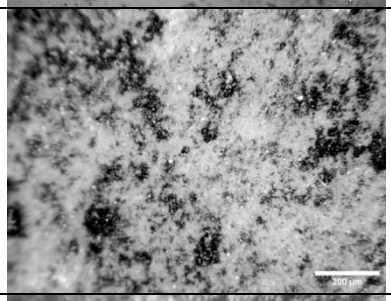
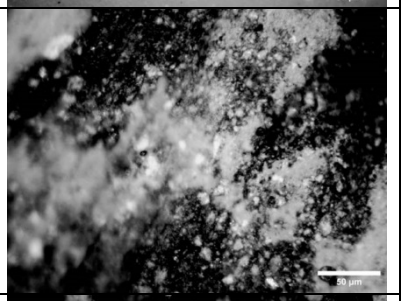
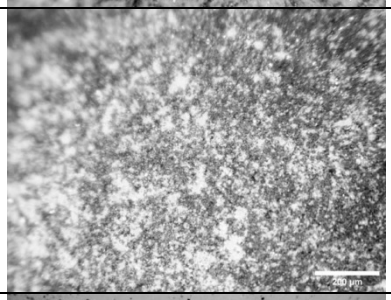
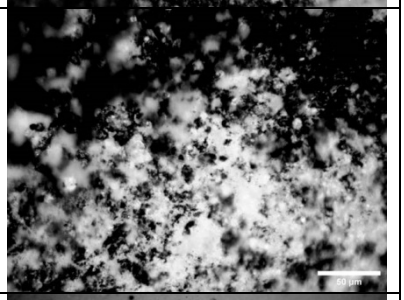
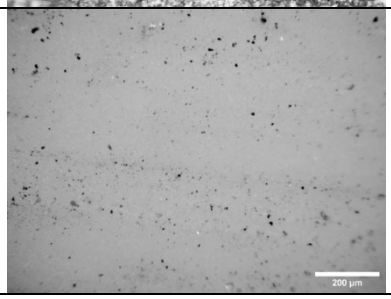
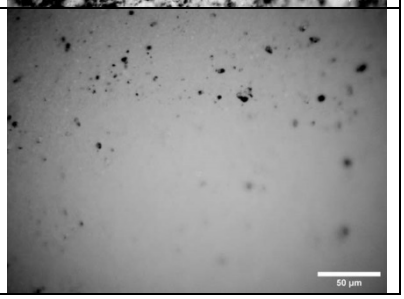
4.3.4.12 Μονωτήρας P12

Πλευρά	Μεγέθυνση x10	Μεγέθυνση x40
HV Top		
HV Bottom		
HV Bulk		
Middle Top		
Middle Bottom		

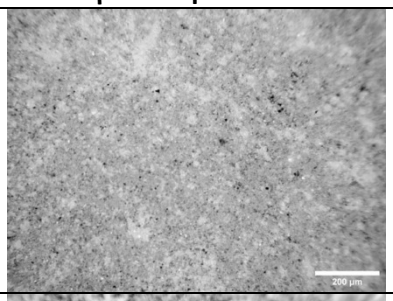
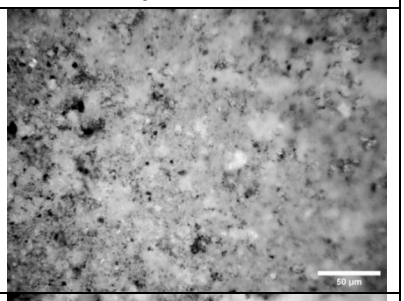
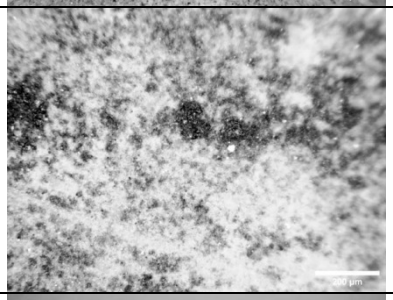
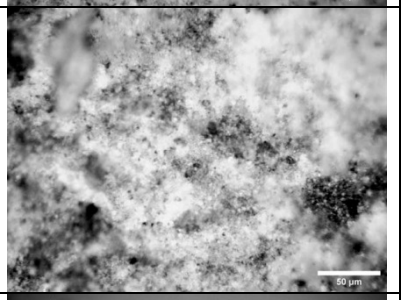
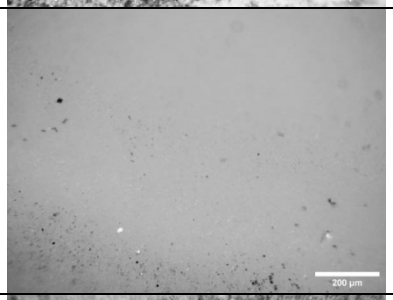
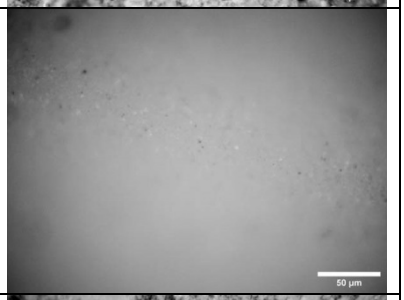
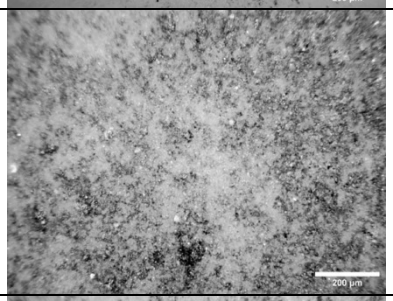
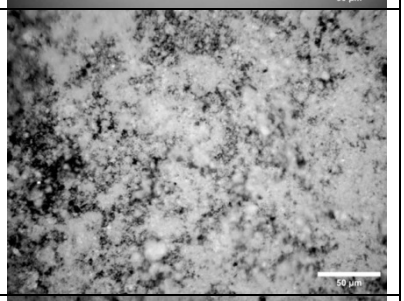
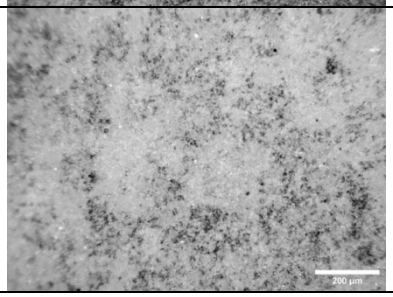
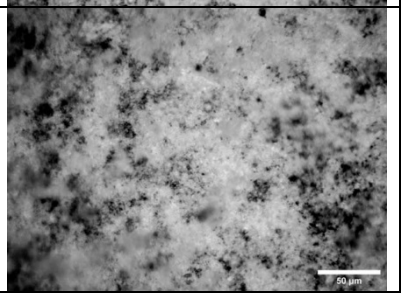
Middle Bulk			
Ground Top			
Ground Bottom			
Ground Bulk			

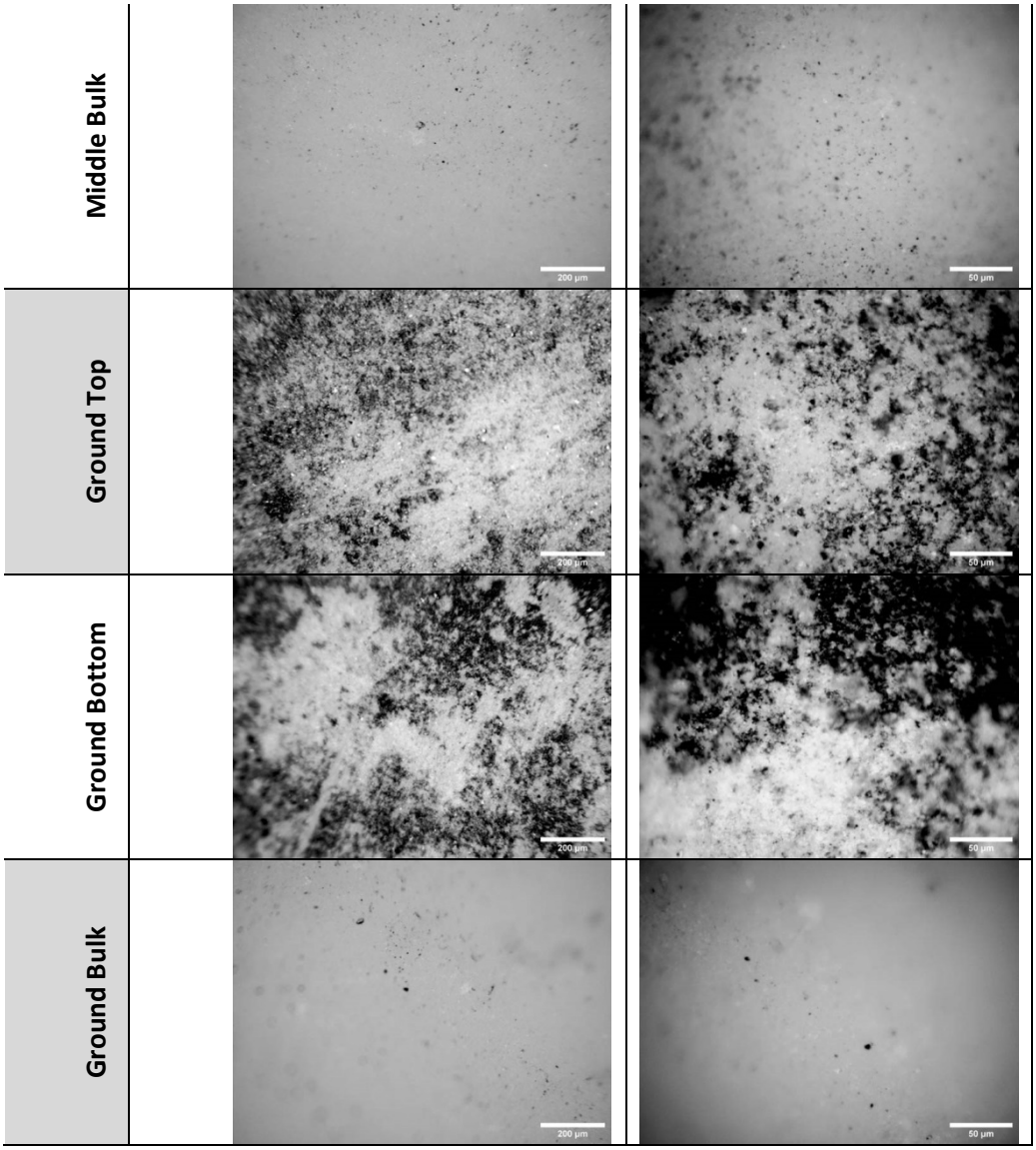
4.3.4.13Μονωτήρας P13

Πλευρά	Μεγέθυνση x10	Μεγέθυνση x40
HV Top		
HV Bottom		
HV Bulk		
Middle Top		
Middle Bottom		

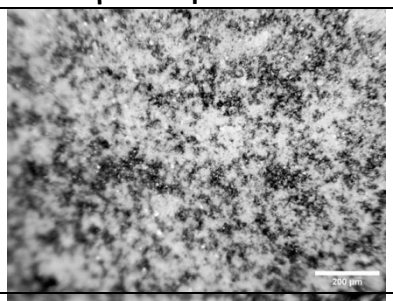
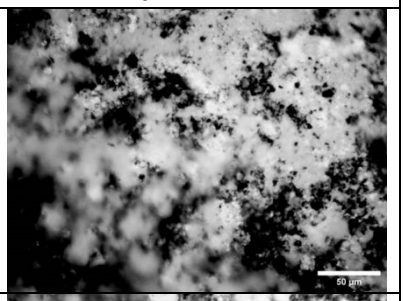
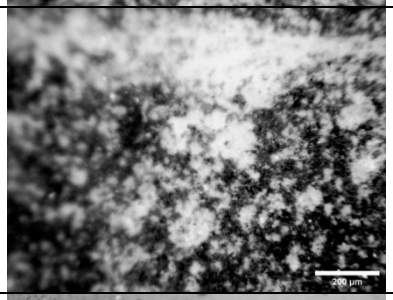
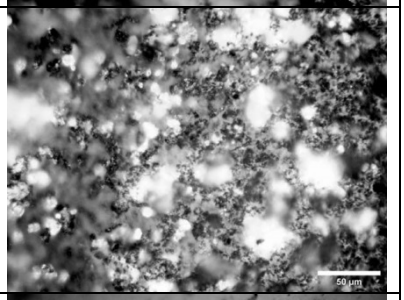
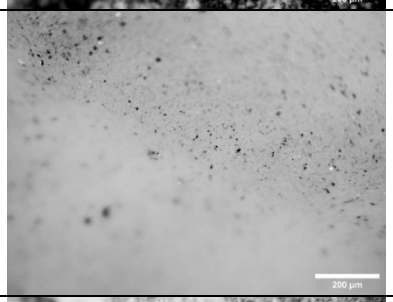
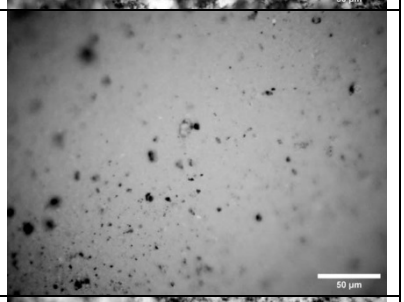
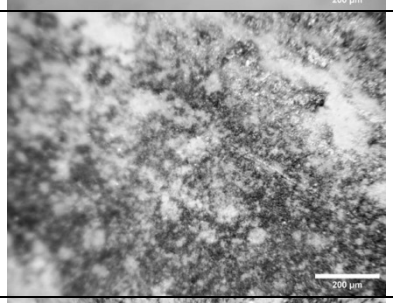
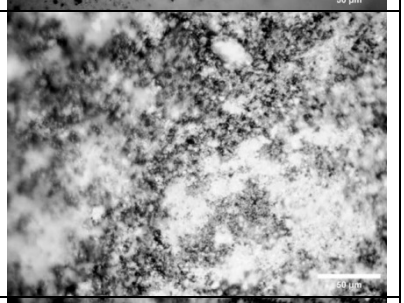
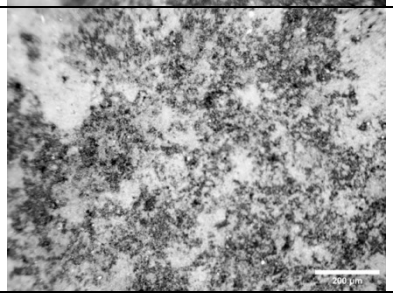
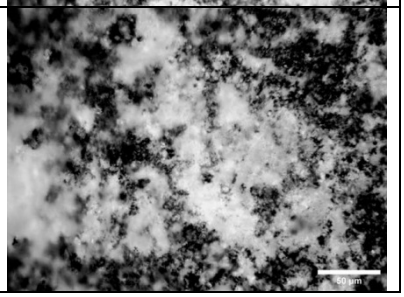
Middle Bulk			
Ground Top			
Ground Bottom			
Ground Bulk			

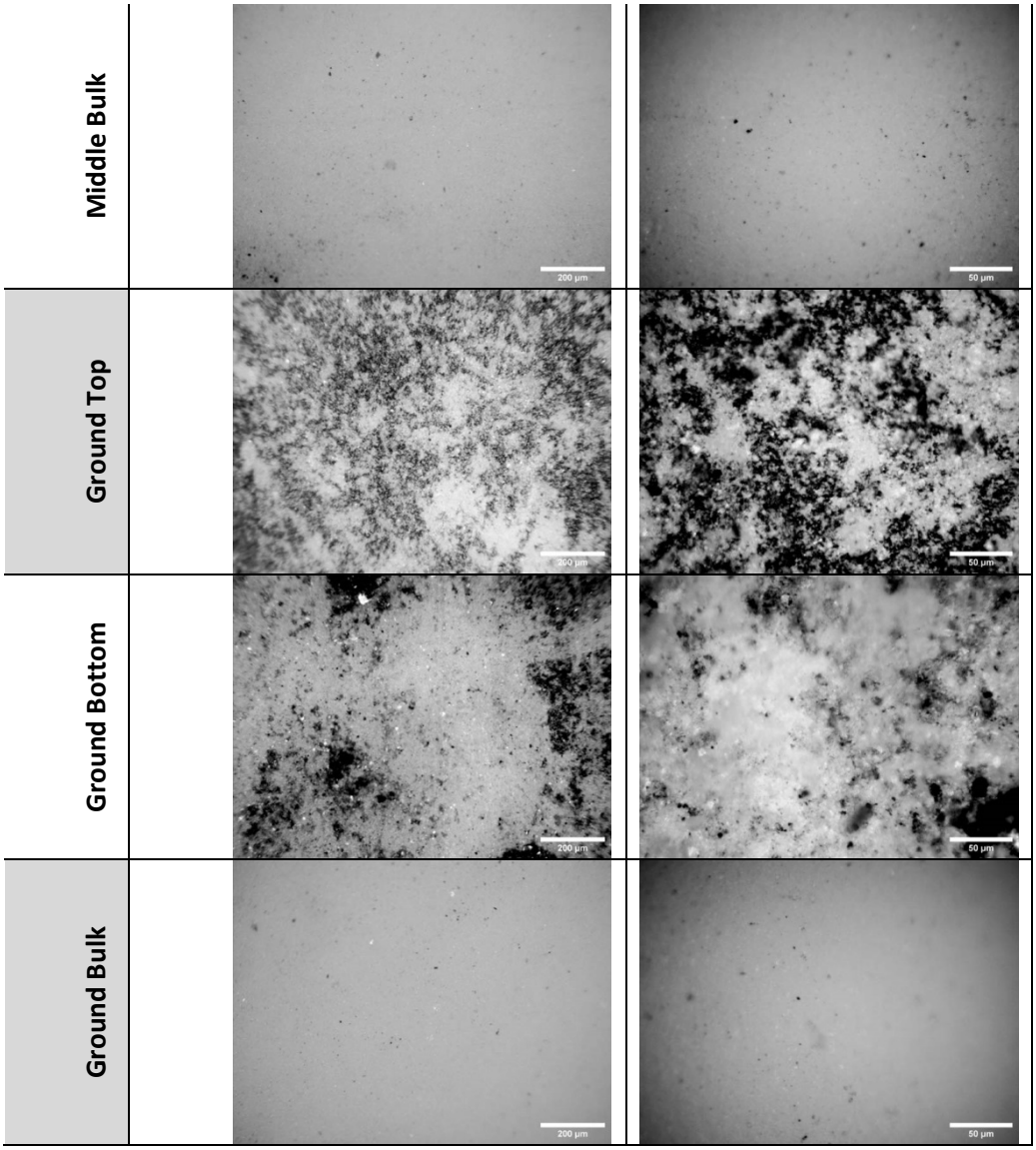
4.3.4.14Μονωτήρας P14

Πλευρά	Μεγέθυνση x10	Μεγέθυνση x40
HV Top		
HV Bottom		
HV Bulk		
Middle Top		
Middle Bottom		

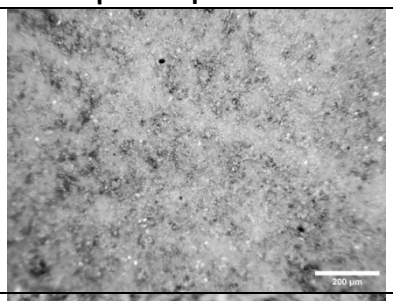
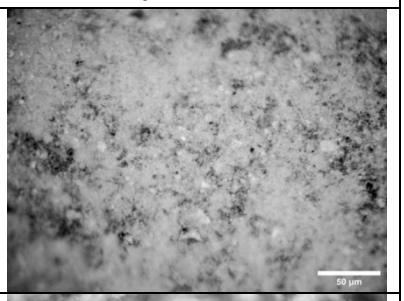
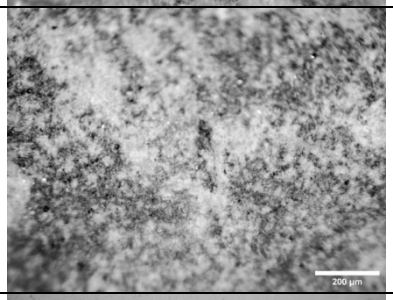
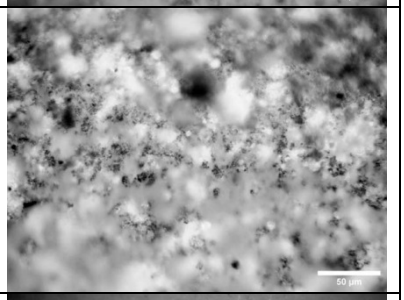
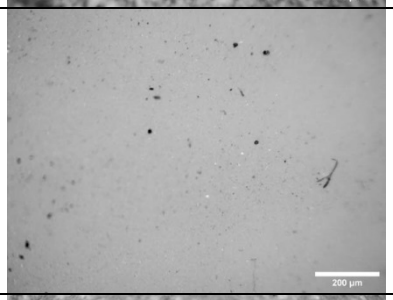
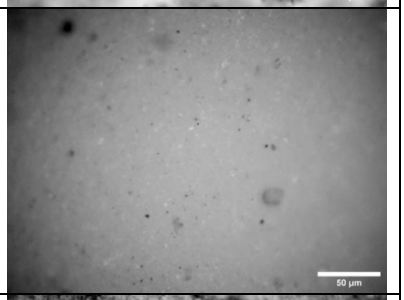
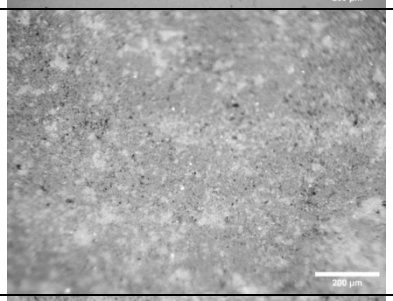
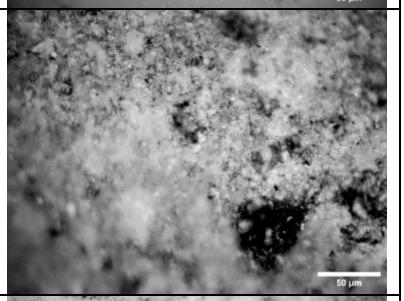
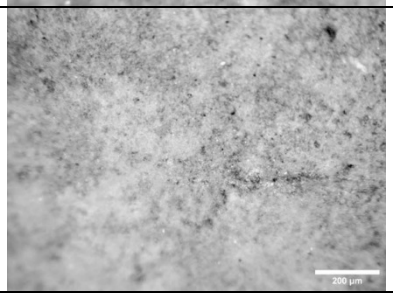
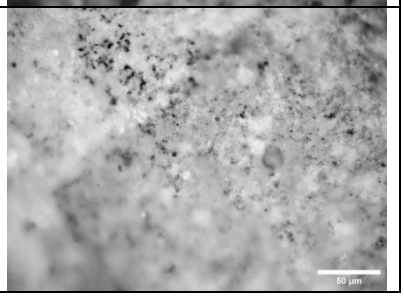

Middle Bulk
Ground Top
Ground Bottom
Ground Bulk
200 µm
50 µm

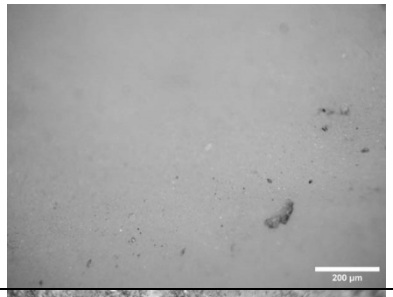
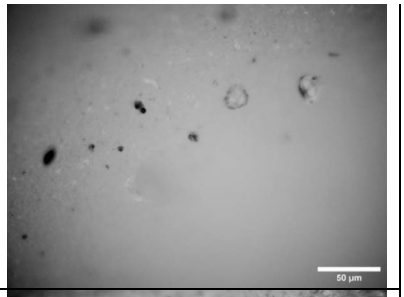
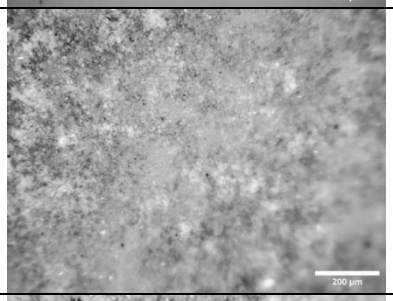
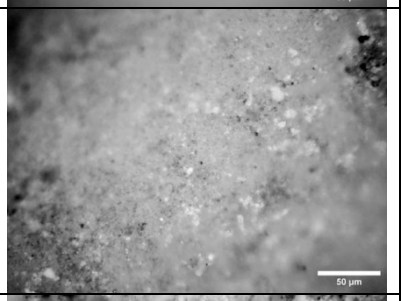
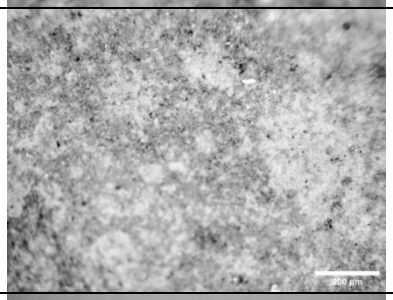
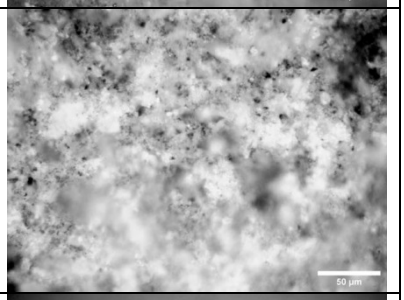
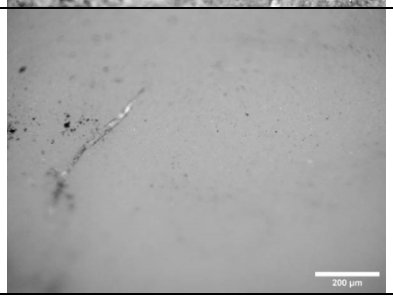
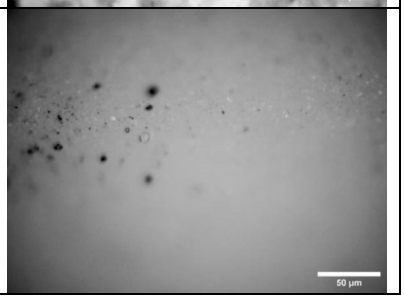
4.3.4.15Μονωτήρας P15

Πλευρά	Μεγέθυνση x10	Μεγέθυνση x40
HV Top		
HV Bottom		
HV Bulk		
Middle Top		
Middle Bottom		

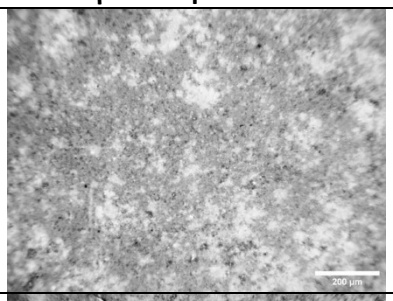
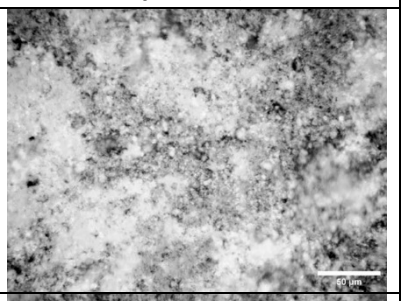
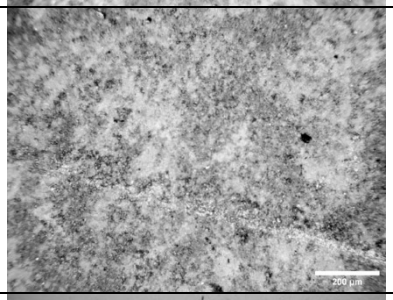
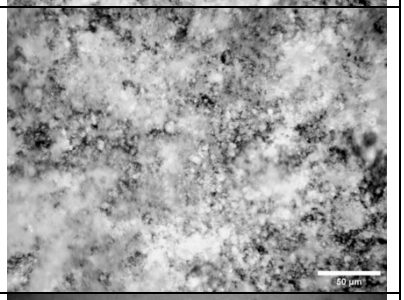
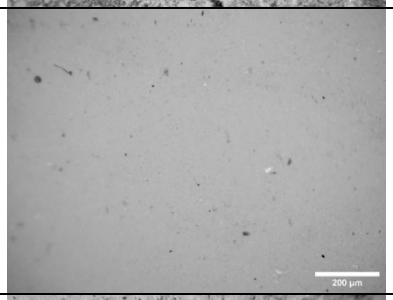
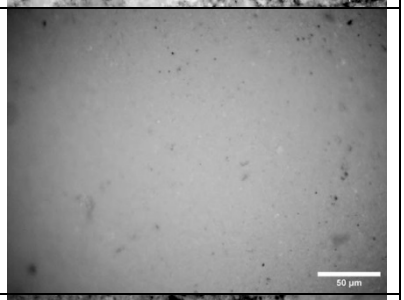
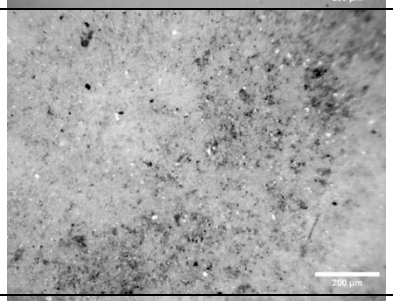
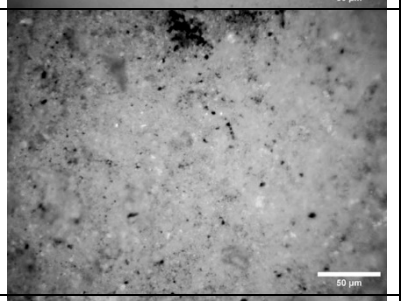
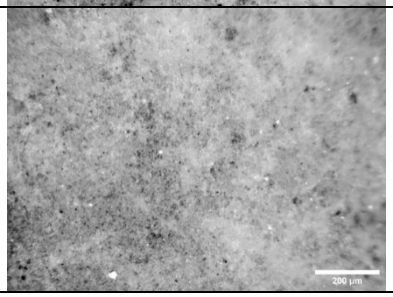
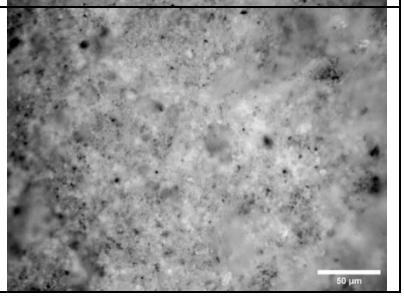

Middle Bulk
Ground Top
Ground Bottom
Ground Bulk
200 µm
50 µm

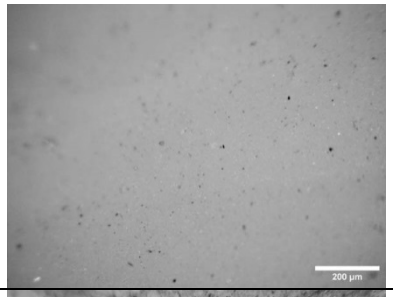
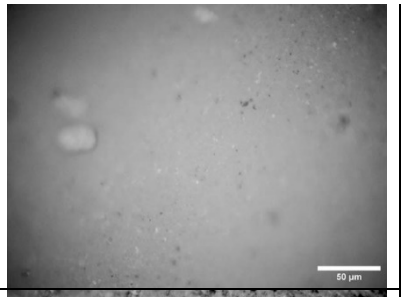
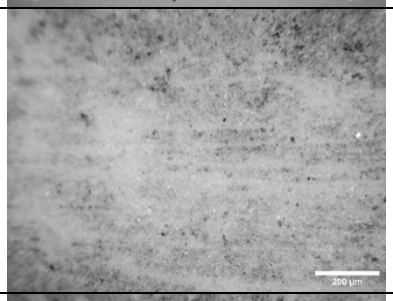
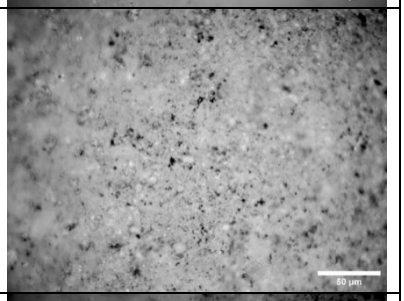
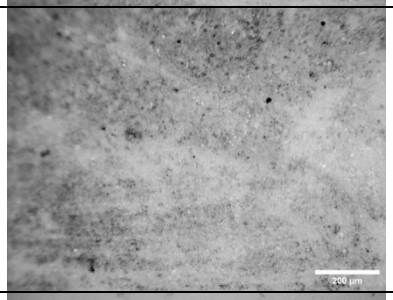
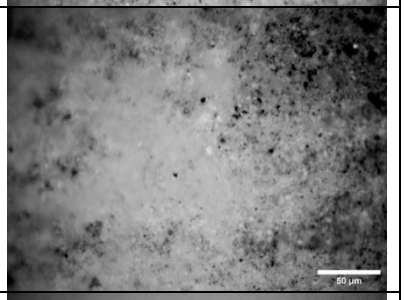
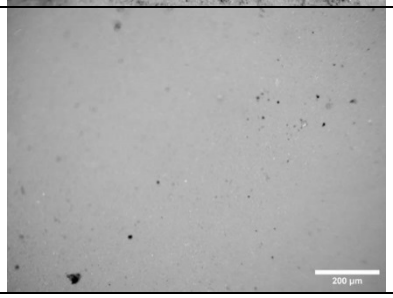
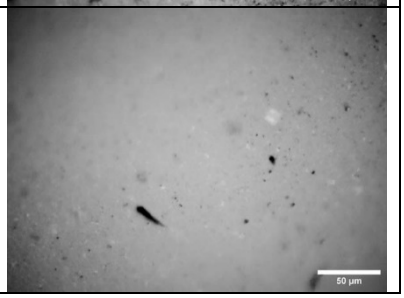
4.3.4.16Μονωτήρας P16

Πλευρά	Μεγέθυνση x10	Μεγέθυνση x40
HV Top		
HV Bottom		
HV Bulk		
Middle Top		
Middle Bottom		

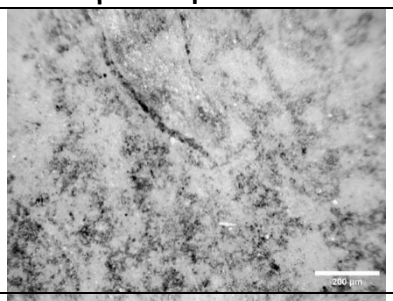
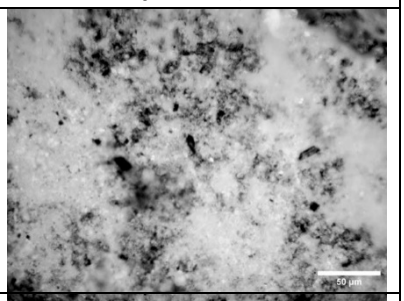
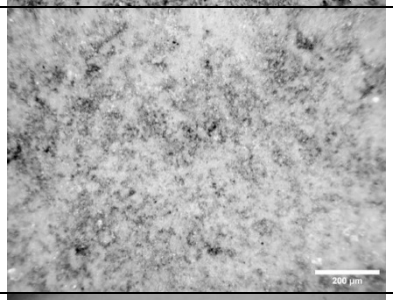
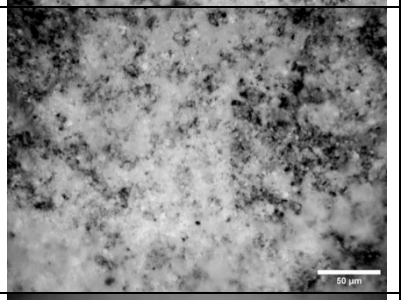
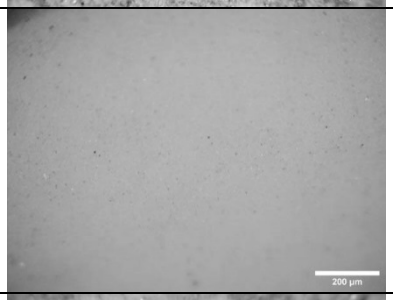
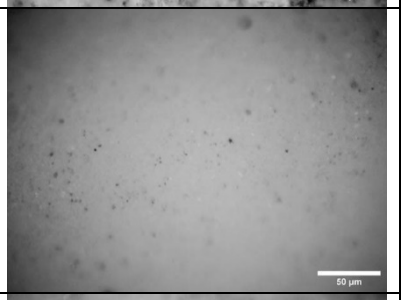
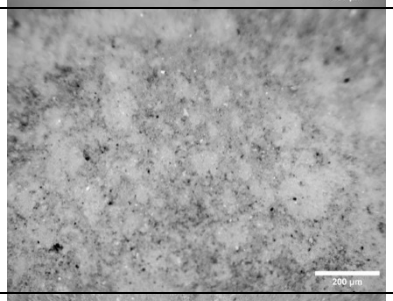
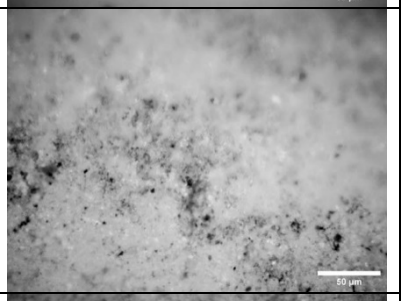
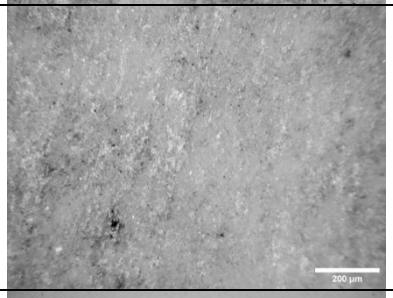
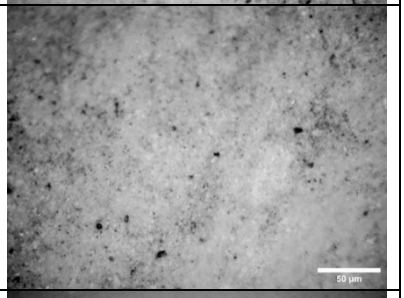
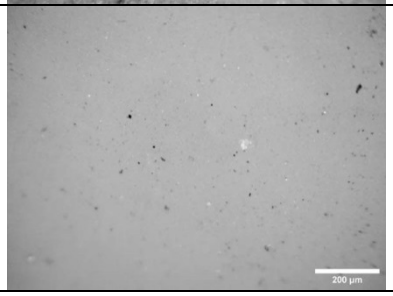
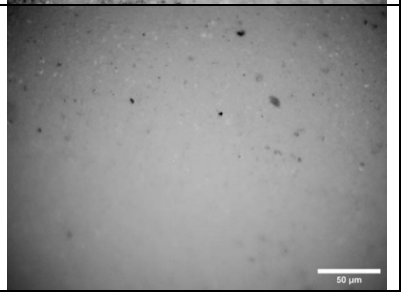
Middle Bulk			
Ground Top			
Ground Bottom			
Ground Bulk			

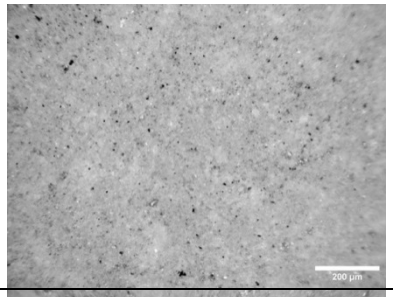
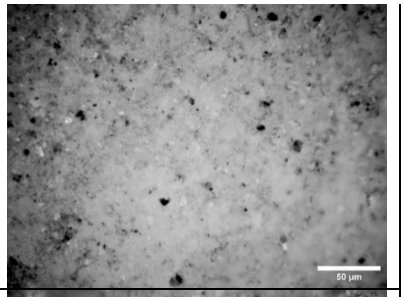
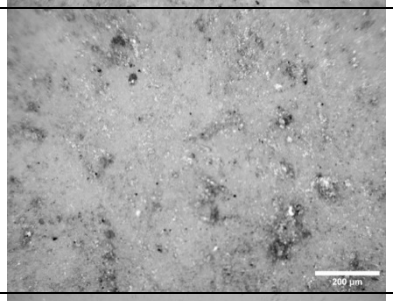
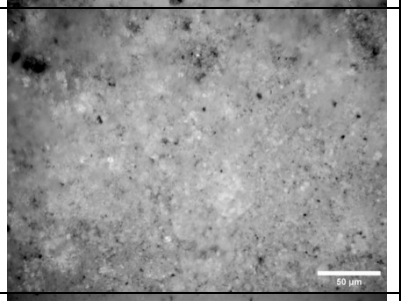
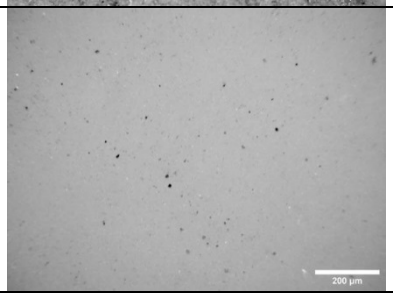
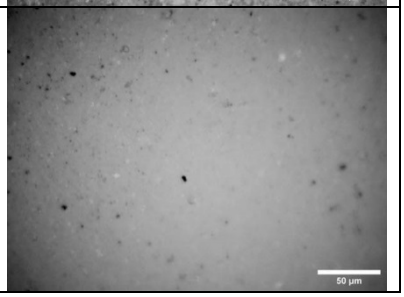
4.3.4.17Μονωτήρας P17

Πλευρά	Μεγέθυνση x10	Μεγέθυνση x40
HV Top		
HV Bottom		
HV Bulk		
Middle Top		
Middle Bottom		

Middle Bulk			
Ground Top			
Ground Bottom			
Ground Bulk			

4.3.4.18Μονωτήρας P18

Πλευρά	Μεγέθυνση x10	Μεγέθυνση x40
HV Top		
HV Bottom		
HV Bulk		
Middle Top		
Middle Bottom		
Middle Bulk		

Ground Top			
Ground Bottom			
Ground Bulk			

4.3.4.19Συζήτηση – Οπτική μικροσκοπία

Στις υποενότητες 1.3.4.1-1.3.4.18 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές εικόνες οπτικού μικροσκοπίου τόσο για το υλικό επιφανείας όσο και για το εσωτερικό υλικό των δειγμάτων που ελήφθησαν κατά μήκος του πολυμερικού περιβλήματος των μονωτήρων που υπέστησαν φθορά λόγω της δασικής πυρκαγιάς.

Στο υλικό επιφανείας (top, bottom) είναι εμφανείς οι μορφολογικές αλλοιώσεις οι οποίες ωστόσο περιορίζονται στις ανώτερες στρώσεις του υλικού σε βάθος της τάξης των μερικών μm που είναι σημαντικά μικρότερο από το πάχος του πολυμερικού περιβλήματος των μονωτήρων (~5mm). Οι μορφολογικές αλλοιώσεις στο υλικό επιφανείας είναι εντονότερες για τους μονωτήρες P8, P13 και P15, οι οποίοι και μέσω της οπτικής επιθεώρησης χαρακτηρίζονται ως οι μονωτήρες που έχουν εμφανέστερα ίχνη καύσης στο πολυμερικό περίβλημα. Επιπροσθέτως, για τους συγκεκριμένους μονωτήρες, μέσω του οπτικού μικροσκοπίου παρατηρείται αλλοίωση και στο εσωτερικό υλικό του πολυμερικού περιβλήματος καθώς είναι εμφανή μαύρου χρώματος τα οποία αποτελούν υπολείμματα καύσης του πολυμερικού περιβλήματος.

Συμπερασματικά παρατηρείται μορφολογική ανομοιογένεια, που σχετίζεται με αύξηση της τραχύτητας, στο υλικό επιφανείας του πολυμερικού περιβλήματος λόγω των θερμικών επιπτώσεων της δασικής πυρκαγιάς, η οποία περιορίζεται κυρίως στις ανώτερες στρώσεις του υλικού.

4.4 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Διεξήχθη αξιολόγηση της κατάστασης δεκαοκτώ φυσικά γηρασμένων 150 kV SIR μονωτήρων ανάρτησης, ακολούθως της θερμικής καταπόνησης που υπέστησαν από δασική πυρκαγιά, μέσω μακροσκοπικών και μικροσκοπικών διαγνωστικών τεχνικών, συμπεριλαμβανομένων της οπτικής επιθεώρησης, της διαβάθμισης της διαβροχής, της φασματοσκοπίας υπερύθρου με αποσβένουσα ολική ανάκλαση, και της οπτικής μικροσκοπίας. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την αξιολόγηση των επιπτώσεων της θερμικής καταπόνησης του πολυμερικού περιβλήματος εξαιτίας της δασικής πυρκαγιάς συνοψίζονται:

- Η δασική πυρκαγιά που εκδηλώθηκε κάτω ακριβώς από τις εναέριες γραμμές μεταφοράς που λειτουργούσαν οι μονωτήρες είχε ως αποτέλεσμα την υπερπήδηση των μονωτήρων με αποτέλεσμα να προκληθεί διακοπή ηλεκτροδότησης στην νήσο Ρόδος. Επίσης, η υπερβολικά υψηλή θερμοκρασία που αναπτύχθηκε λόγω της δασικής πυρκαγιάς είχε ως αποτέλεσμα κάποιοι μονωτήρες να έχουν εμφανή ίχνη καύσης στην επιφάνεια του πολυμερικού περιβλήματος τους.
- Οι θερμικές επιπτώσεις της πυρκαγιάς δεν είναι κρίσιμες για το πολυμερικό περίβλημα του μονωτήρα καθώς η φθορά περιορίζεται κυρίως στο υλικό επιφανείας. Οι μορφολογικές αλλοιώσεις εξαιτίας της καύσης του υλικού περιοριζόταν στο υλικό επιφανείας σε βάθος μερικών μm.
- Το πολυμερικό περίβλημα των μονωτήρων δεν είχε διατρηθεί. Ωστόσο, μέσω της οπτικής μικροσκοπίας εντοπίστηκαν ίχνη καύσης περιορισμένης έκτασης στο εσωτερικό υλικό του πολυμερικού περιβλήματος των μονωτήρων που εντοπίστηκαν ως περισσότερο φθαρμένοι μέσω της οπτικής επιθεώρησης.
- Χαρακτηριστικό γνώρισμα των περιοχών του πολυμερικού περιβλήματος που είχαν υποστεί καύση είναι παρουσία πούδρας ως προϊόν της καύσης του πολυμερούς. Επιπροσθέτως, εντοπίστηκαν μικροσκοπικές σχισμές, ακαθόριστης κατανομής και μεταβλητής έντασης, που σχετίζονται με αύξηση της επιφανειακής τραχύτητας της συγκεκριμένης περιοχής.
- Το πολυμερικό περίβλημα των μονωτήρων εξακολουθεί και είναι υδρόφοβο παρόλο που έχει εμφανή ίχνη καύσης. Οι μονωτήρες που είχαν ίχνη καύσης ισχυρής έντασης (P8, P13 και P15) ήταν λιγότερο υδρόφοβοι (WC4) σε σχέση με αυτούς που δεν είχαν.
- Από την ανάλυση των μετρήσεων της στατικής γωνίας επαφής προκύπτει ότι το υλικό επιφάνειας του πολυμερικού περιβλήματος των μονωτήρων που είχαν υποστεί φθορά λόγω της δασικής πυρκαγιάς είναι περισσότερο υδρόφοβο σε σχέση με το εσωτερικό υλικό. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να ερμηνευθεί από τις αντιδράσεις διάσπασης που λαμβάνουν χώρα στην δομή του πολυμερούς σιλικόνης λόγω της θερμότητας και έχουν ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό στοιχείων χαμηλού μοριακού βάρους (LMW), που σχετίζονται με εξαιρετικά υδρόφοβες ιδιότητες.

- Από την ανάλυση των φασμάτων απορρόφησης υπερύθρου διαπιστώθηκε ότι οι μονωτήρες που εξετάστηκαν είναι σιλικόνης αλλά διαφέρουν ως προς την σύστασή τους. Οι μονωτήρες P2 και P6 είναι μονωτήρες LSR SIR ενώ οι υπόλοιποι είναι HTV SIR. Οι μονωτήρες HTV SIR έχουν ως υλικό πλήρωσης ένυδρη αλουμίνα. Συγκρίνοντας τα φάσματα απορρόφησης του υλικού επιφανείας και του εσωτερικού υλικού του πολυμερικού περιβλήματος διαπιστώθηκαν μοριακές μεταβολές στην δομή του πολυμερούς. Συγκεκριμένα για τους μονωτήρες HTV SIR εντοπίστηκε αφυδάτωση του υλικού πλήρωσης, απορρόφηση νερού στην επιφάνεια του πολυμερικού περιβλήματος, αποδόμηση στους δεσμούς Si-C και C-H. Για τους μονωτήρες LSR SIR εντοπίστηκε υδρόλυση του πολυμερούς SIR, απορρόφηση νερού στην επιφάνεια του πολυμερικού περιβλήματος και αποδόμηση στους δεσμούς Si-C και C-H.

4.5 Βιβλιογραφία

[1] IEC 60383-1, “Insulators for overhead lines with nominal voltage above 1000 V.” 1993.

[2] IEC 61109, “Composite suspension and tension insulators for ac overhead lines with a nominal voltage greater than 1000 V - Definitions, test methods and acceptance criteria.” 2008.

[3] IEC 60120, *Dimensions of ball and socket couplings of string insulator units*, Third Edit. 1984.

[4] I. 60815-3, “Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 3: Polymer insulators for a.c. systems,” 2008.

[5] STRI - Guide 5, “Guide for visual identification of deterioration & damages on suspension composite insulators.” 2005.

[6] EPRI, “Field guide: visual inspection of polymer insulators,” 2006.

[7] IEC 62073, “Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces,” 2003.

[8] N. Mavrikakis, K. Siderakis, P. N. Mikropoulos, and N. Katsarakis, “Condition assessment of a field-aged 150 kV HTV SIR suspension insulator following flashover,” in *Proc. 19th Int’l. Sympos. High Voltage Eng, PS04-116*, 2015, pp. 23–28.

[9] H. C. Hillborg, “Loss and Recovery of Hydrophobicity of Polydimethylsiloxane after Exposure to Electrical Discharges,” Royal Institute of Technology, 2001.

[10] H. Hillborg and U. W. Gedde, “Hydrophobicity changes in silicone rubbers,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 6, no. 5, pp. 703–717, 1999.

[11] B. Venkatesulu and M. J. Thomas, “Corona aging studies on silicone rubber nanocomposites,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 17, no. 2, pp. 625–634, 2010.

[12] H. Hillborg, M. Sandelin, and U. W. Gedde, “Hydrophobic recovery of polydimethylsiloxane after exposure to partial discharges as a function of crosslink density,” *Polymer (Guildf).*, vol. 42, no. 17, pp. 7349–7362, 2001.

[13] P. D. Blackmore, “Degradation of polymeric outdoor high voltage insulation: surface discharge phenomena and condition assessment techniques,” Queensland University of Technology, 1997.

[14] Z. Guan, L. Wang, and B. Yang, “Electric field analysis of water drop corona,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 2, pp. 964–969, 2005.

[15] Y. Zhu, M. Otsubo, and C. Honda, “Behavior of water droplet on electrically stressed polymeric coating surface,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 201, no. 9–11 SPEC. ISS., pp. 5541–5546, 2007.

[16] M. Morra, E. Occhiello, R. Marola, F. Garbassi, P. Humphrey, and D. Johnson, “On the aging of oxygen plasma-treated polydimethylsiloxane surfaces,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 137, no. 1, pp. 11–24, 1990.

[17] J. Kim, M. K. Chaudhury, M. J. Owen, and T. Orbeck, “The Mechanisms of Hydrophobic Recovery of Polydimethylsiloxane Elastomers Exposed to Partial Electrical Discharges,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 244, no. 1, pp. 200–207, 2001.

[18] S. Kumagai and N. Yoshimura, “Hydrophobic transfer of RTV silicone rubber aged in single and multiple environmental stresses and the behavior of LMW silicone fluid,” *IEEE Trans.*

Power Deliv., vol. 18, no. 2, pp. 506–516, 2003.
[19] Y. Zhu, M. Otsubo, C. Honda, and S. Tanaka, "Loss and recovery in hydrophobicity of silicone rubber exposed to corona discharge," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 91, no. 7, pp. 1448–1454, 2006.
[20] A. W. Adamson and A. P. Gast, *Physical Chemistry of Surfaces*, 6th ed. 1997.
[21] D. Quéré, "Wetting and Roughness," *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 38, no. 1, pp. 71–99, 2008.
[22] N. Yoshimura and S. Kumagai, "Electrical and Environmental Aging of Silicone Rubber Used in Outdoor Insulation," vol. 6, no. 5, pp. 632–650, 1999.
[23] M. T. Nazir, J. Xingliang, and S. Akram, "Laboratory Investigation on Hydrophobicity of New Silicon Rubber Insulator under Different Environmental Conditions," *Int. J. Electr. Comput. Sci.*, vol. 12, no. June, pp. 1–8, 2012.
[24] CIGRE WG D1.27, "Fingerprinting of polymeric insulating materials for outdoor use," no. TB No 595. 2014.
[25] A. Vlastos and S. Gubanski, "Surface structural changes of naturally aged silicone and EPDM composite insulators," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 6, no. 2, pp. 888–900, 1991.
[26] S.-H. Kim, E. A. Cherney, R. Hackam, and K. G. Rutherford, "Chemical changes at the surface of RTV silicone rubber coatings on insulators during dry-band arcing," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 1, no. 1, pp. 106–123, 1994.
[27] T. Sörqvist and A. E. Vlastós, "Performance and ageing of polymeric insulators," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 12, no. 4, pp. 1657–1665, 1997.
[28] H. Liu, G. Cash, D. Birtwhistle, and G. George, "Characterization of a severely degraded silicone elastomer HV insulator - An aid to development of lifetime assessment techniques," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 12, no. 3, pp. 478–486, 2005.

5. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

5.1 Συμπεράσματα

Οι πυρκαγιές εκτός από τις καταστροφικές επιπτώσεις τους στο οικοσύστημα, μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές ζημιές στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Πέραν από την ζημιά στον εξοπλισμό του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να προκληθεί τραυματισμός ή θάνατος στους ανθρώπους που επιχειρούν στην κατάσβεση της πυρκαγιάς από ηλεκτροπληξία λόγω της ηλεκτρικής διάσπασης της μόνωσης του αέρα. Για την αποφυγή ηλεκτροπληξίας κάτω από τις εναέριες γραμμές, έχει νομοθετηθεί το καθεστώς της ζώνης δουλείας στις οδεύσεις των εναέριων γραμμών μεταφοράς, το οποίο στην πράξη καταπατείται από τους ιδιοκτήτες γης. Επιπροσθέτως η έκταση που καταλαμβάνει η ζώνη δουλείας δεν επαρκεί για την αποφυγή ηλεκτροπληξίας στην περίπτωση πυρκαγιάς. Για το λόγο αυτό με βάση τη βιβλιογραφία προτείνεται υπολογισμός της ελάχιστης ασφαλούς απόστασης από τις εναέριες γραμμές μεταφοράς τόσο της βλάστησης όσο και των ανθρώπων στην περίπτωση πυρκαγιάς. Ακόμη καταγράφεται η εμπειρία από τις εταιρίες ηλεκτρισμού ανά τον κόσμο και των μέτρων που λαμβάνουν προκειμένου να περιορίσουν τις αρνητικές επιπτώσεις στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Στην Ελλάδα μόλις το 2023 σύμφωνα με το Νόμο 5075/2023 ΦΕΚ206/Α Άρθρο 32 αποφασίστηκε η διάνοιξη αντιπυρικών ζωνών εντός των ζωνών δουλείας των γραμμών με αρμοδιότητα του διαχειριστή του Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας. Βάσει της εμπειρίας από την καταστροφική πυρκαγιά στην Ρόδο το καλοκαίρι του 2021 παρέχονται πληροφορίες σχετικά με τις φθορές που υπέστη ο εγκατεστημένος εξοπλισμός και ειδικά οι συνθετικοί μονωτήρες στις γραμμές μεταφοράς 150kV. Για την αξιολόγηση της φθοράς που υπέστησαν οι συνθετικοί μονωτήρες λόγω της θερμικής καταπόνησής τους από την πυρκαγιά, εφαρμόστηκαν διάφορες μακροσκοπικές και μικροσκοπικές τεχνικές και αναλύονται οι επιπτώσεις τόσο στην χημική σύνθεση του πολυμερικού υλικού όσο και στην υδροφοβία του.

5.1.1 Επιπτώσεις των δασικών πυρκαγιών στο σύστημα μεταφοράς

Η ζημιά που προκαλείται στις εναέριες γραμμές μεταφοράς και γενικότερα στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας από δασικές πυρκαγιές είναι σημαντική και σχετίζεται με:

Α. Υλική ζημιά στον εγκατεστημένο εξοπλισμό

– Φθορά ή θραύση των εναέριων αγωγών λόγω της έντονης θερμικής καταπόνησης ή της ανάπτυξης ηλεκτρικού τόξου εξαιτίας της υποβάθμισης της μόνωσης του αέρα.

- Καταστροφή του συστήματος αντιδιαβρωτικής προστασίας του μεταλλικού πύργου
- Καταστροφή του συστήματος στήριξης των εναέριων αγωγών λόγω της θερμικής καταπόνησης τους σε συνδυασμό με τους ισχυρούς ανέμους
- Καταστροφή των Μετασχηματιστών
- Ζημιά στους μονωτήρες
- Ζημιά στον εξοπλισμό προστασίας στους υποσταθμούς από την ανίχνευση σφαλμάτων

Β. Οικονομική ζημιά

- Αντικατάσταση του εξοπλισμού που έχει υποστεί ζημιά
- Διακοπή ηλεκτροδότησης από την πρόκληση σφάλματος στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

Γ. Τραυματισμός/ Απώλεια ζωής

- Λόγω της υποβάθμισης της μόνωσης του αέρα μπορεί να συμβεί σφάλμα προς γη, με ανάπτυξη ηλεκτρικού τόξου, με αποτέλεσμα οι άνθρωποι που βρίσκονται πλησίον των εναέριων γραμμών να κινδυνεύουν από ηλεκτροπληξία.

5.1.2 Ηλεκτρική διάσπαση της μόνωσης του αέρα σε συνθήκες πυρκαγιάς και κίνδυνος ηλεκτροπληξίας

Στην περίπτωση πυρκαγιάς κάτω από εναέριες γραμμές είναι πιθανό να αναπτυχθεί ηλεκτρικό τόξο ανάμεσα στα στοιχεία του εξοπλισμού που βρίσκονται σε διαφορετικό ηλεκτρικό δυναμικό εξαιτίας της διάσπασης της μόνωσης του αέρα. Η ηλεκτρική διάσπαση του αέρα εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, την ένταση της φλόγας καθώς και το είδος της βλάστησης που καίγεται. Σε εναέριες γραμμές μεταφοράς που λειτουργούν σε επίπεδο τάσης μεγαλύτερο από 220kV είναι πιθανότερο να συμβεί σφάλμα από φάση ως προς φάση ή από φάση ως προς τον αγωγό προστασίας. Η πιθανότητα σφάλματος ως προς γη αυξάνει όταν το διάκενο του αέρα γεφυρώνεται με φλόγα.

Το ηλεκτρικό πλήγμα ως προς γη κάτω από μια γραμμή μεταφοράς είναι ιδιαιτέρως επικίνδυνο για τους ανθρώπου που βρίσκονται πλησίον της γραμμής μεταφοράς. Το δυναμικό γύρω από το σημείο του πλήγματος ανυψώνεται με αποτέλεσμα οι άνθρωποι που βρίσκονται πλησίον κινδυνεύουν από ηλεκτροπληξία λόγω ανάπτυξης βηματικής τάσης. Εξίσου επικίνδυνο για τους ανθρώπους είναι το σφάλμα να συμβεί ως προς την μεταλλική δομή στήριξης καθώς ανυψώνεται το

δυναμικό στην βάση του πύργου επομένως σε περίπτωση που βρίσκονται σε επαφή με τον μεταλλικό πύργο κινδυνεύουν λόγω του δυναμικού επαφής.

5.1.3 Αποστάσεις ασφαλείας από τις εναέριες γραμμές μεταφοράς

Για την αποφυγή των ατυχημάτων κάτω από τις εναέριες γραμμές μεταφοράς απαιτείται η τήρηση των αποστάσεων ασφαλείας οι οποίες πρέπει να υπολογίζονται σε συνθήκες πυρκαγιάς και ισχυρής έντασης ανέμου. Για τον υπολογισμό της ελάχιστης απόστασης ασφαλείας λαμβάνονται υπόψη δύο παράμετροι:

1. Η οριζόντια απόσταση από την εξωτερική φάση έως το σημείο του εδάφους που θα καταλήξει το πλήγμα υπό συνθήκες ανέμου.
2. Την ελάχιστη απόσταση μεταξύ της θέσης του ανθρώπου και του σημείου του εδάφους που καταλήγει το πλήγμα.

Η ελάχιστη οριζόντια απόσταση από τους εναέριους αγωγούς μεταφοράς εξαρτάται από το επίπεδο τάσης λειτουργίας της γραμμής καθώς και από το μέσο πεδίο διάσπασης της μόνωσης του αέρα που εξαρτάται από το είδος της καύσιμης ύλης και πειραματικά έχει βρεθεί ότι κυμαίνεται από 11 έως 12 kV/m. Η ελάχιστη οριζόντια απόσταση για τις γραμμές μεταφοράς 150kV προκύπτει 8.7 m.

Ο υπολογισμός της ελάχιστης απόστασης ασφαλείας εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος σφάλματος του συστήματος και την μέγιστη διάρκεια του, την μέγιστη τάση λειτουργίας της γραμμής, την ειδική αντίσταση του εδάφους και το πεδίο διάσπασης του εδάφους. Η ελάχιστη απόσταση ασφαλείας από το σημείο του ηλεκτρικού πλήγματος για τις γραμμές μεταφοράς 150kV προκύπτει 10.2 m.

Τα μέτρα που πρέπει να τηρούνται σε περίπτωση πυρκαγιάς κάτω από μια εναέρια γραμμή μεταφοράς είναι:

- Τήρηση των ελάχιστων αποστάσεων ασφαλείας από τις εναέριες γραμμές μεταφοράς.
- Οι άνθρωποι που επιχειρούν στην κατάσβεση της πυρκαγιάς ή τα μέσα που επιχειρούν να μην είναι σε άμεση επαφή με μεταλλικά αντικείμενα που είναι σε επαφή με τους μεταλλικούς πύργους.
- Εάν η φωτιά εκδηλωθεί εντός της ζώνης δουλείας θα πρέπει ο διαχειριστής να απενεργοποιήσει την γραμμή για την ασφαλή κατάσβεσή της.

5.1.4 Μέτρα περιορισμού των αρνητικών επιπτώσεων των πυρκαγιών στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Τα πιο συχνά προβλήματα στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας ανά τον κόσμο λόγω πυρκαγιάς έχουν καταγραφεί σε αγροτικές περιοχές όπου καλλιεργούνται ζαχαροκάλαμα και η συγκομιδή τους γινόταν με καύση της φυτείας.

Οι ενέργειες που έχουν εφαρμοστεί για την αντιμετώπιση του προβλήματος είναι:

- Αύξηση της απόστασης των αγωγών από το έδαφος με αντικατάσταση των πύργων ή προσθήκη προεκτάσεων
- Απαγόρευση καλλιέργειας ζαχαρότευτλων κάτω από τις γραμμές μεταφοράς και αποζημίωση των αγροτών
- Αντικατάσταση της εφαρμοζόμενης μεθόδου συγκομιδής με χρήση αγροτικών μηχανημάτων αντί της καύσης
- Φύτευση εναλλακτικών καλλιεργειών χαμηλής βλάστησης κάτω από τις γραμμές μεταφοράς.
- Περιοδικές εργασίες αποψίλωσης της ζώνης δουλείας
- Εκπαιδευτικές καμπάνιες ενημέρωσης του κοινού
- Στις καινούργιες γραμμές μεταφοράς, κοπή των δέντρων εντός της ζώνης δουλείας

Συμπερασματικά η αντιμετώπιση του προβλήματος είναι η αποφυγή πυρκαγιάς ισχυρής έντασης εντός της ζώνης δουλείας. Τα μέτρα που λαμβάνονται εξαρτώνται από κοινωνικούς και οικονομικούς παράγοντες στις περιοχές που εφαρμόζονται.

5.1.5 Επιπτώσεις της πυρκαγιάς στα μονωτικά υλικά συνθετικών μονωτήρων

Αξιολογήθηκε η κατάσταση του πολυμερικού περιβλήματος δεκαοκτώ φυσικά γηρασμένων συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης 150 kV ακολούθως της θερμικής καταπόνησης που υπέστησαν από δασική πυρκαγιά, που λειτουργούσαν για 11 χρόνια στο παράκτιο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της Ρόδου. Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν συνοψίζονται ως εξής:

- Η δασική πυρκαγιά που εκδηλώθηκε κάτω ακριβώς από τις εναέριες γραμμές μεταφοράς που λειτουργούσαν οι μονωτήρες είχε ως αποτέλεσμα την υπερπήδηση των μονωτήρων με αποτέλεσμα να προκληθεί διακοπή ηλεκτροδότησης στην νήσο Ρόδος. Επίσης, η υπερβολικά υψηλή θερμοκρασία που αναπτύχθηκε λόγω της δασικής πυρκαγιάς είχε ως αποτέλεσμα κάποιοι μονωτήρες να έχουν εμφανή ίχνη καύσης στην επιφάνεια του πολυμερικού περιβλήματος τους.
- Οι θερμικές επιπτώσεις της πυρκαγιάς δεν είναι κρίσιμες για το πολυμερικό περίβλημα του μονωτήρα καθώς η φθορά περιορίζεται κυρίως στο υλικό

επιφανείας. Οι μορφολογικές αλλοιώσεις εξαιτίας της καύσης του υλικού περιοριζόταν στο υλικό επιφανείας σε βάθος μερικών μm.

- Το πολυμερικό περίβλημα των μονωτήρων δεν είχε διατρηθεί. Ωστόσο, μέσω της οπτικής μικροσκοπίας εντοπίστηκαν ίχνη καύσης περιορισμένης έκτασης στο εσωτερικό υλικό του πολυμερικού περιβλήματος των μονωτήρων που εντοπίστηκαν ως περισσότερο φθαρμένοι μέσω της οπτικής επιθεώρησης.
- Χαρακτηριστικό γνώρισμα των περιοχών του πολυμερικού περιβλήματος που είχαν υποστεί καύση είναι παρουσία πούδρας ως προϊόν της καύσης του πολυμερούς. Επιπροσθέτως, εντοπίστηκαν μικροσκοπικές σχισμές, ακαθόριστης κατανομής και μεταβλητής έντασης, που σχετίζονται με αύξηση της επιφανειακής τραχύτητας της συγκεκριμένης περιοχής.
- Το πολυμερικό περίβλημα των μονωτήρων εξακολουθεί και είναι υδρόφοβο παρόλο που έχει εμφανή ίχνη καύσης. Οι μονωτήρες που είχαν ίχνη καύσης ισχυρής έντασης ήταν λιγότερο υδρόφοβοι σε σχέση με αυτούς που δεν είχαν.
- Από την ανάλυση των μετρήσεων της στατικής γωνίας επαφής προκύπτει ότι το υλικό επιφάνειας του πολυμερικού περιβλήματος των μονωτήρων που είχαν υποστεί φθορά λόγω της δασικής πυρκαγιάς είναι περισσότερο υδρόφοβο σε σχέση με το εσωτερικό υλικό. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να ερμηνευθεί από τις αντιδράσεις διάσπασης που λαμβάνουν χώρα στην δομή του πολυμερούς σιλικόνης λόγω της θερμότητας και έχουν ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό στοιχείων χαμηλού μοριακού βάρους (LMW), που σχετίζονται με εξαιρετικά υδρόφοβες ιδιότητες.
- Από την ανάλυση των φασμάτων απορρόφησης υπερύθρου διαπιστώθηκε ότι οι μονωτήρες που εξετάστηκαν είναι σιλικόνης αλλά διαφέρουν ως προς την σύστασή τους. Οι μονωτήρες HTV SIR έχουν ως υλικό πλήρωσης ένυδρη αλουμίνα. Συγκρίνοντας τα φάσματα απορρόφησης του υλικού επιφανείας και του εσωτερικού υλικού του πολυμερικού περιβλήματος διαπιστώθηκαν μοριακές μεταβολές στην δομή του πολυμερούς. Συγκεκριμένα για τους μονωτήρες HTV SIR εντοπίστηκε αφυδάτωση του υλικού πλήρωσης, απορρόφηση νερού στην επιφάνεια του πολυμερικού περιβλήματος, αποδόμηση στους δεσμούς Si-C και C-H. Για τους μονωτήρες LSR SIR εντοπίστηκε υδρόλυση του πολυμερούς SIR, απορρόφηση νερού στην επιφάνεια του πολυμερικού περιβλήματος και αποδόμηση στους δεσμούς Si-C και C-H.

5.2 Συμβολή της διατριβής

Η συμβολή της διατριβής έγκειται στην αποτίμηση των επιπτώσεων της πυρκαγιάς στους συνθετικούς μονωτήρες που λειτουργούν στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και των μηχανισμών υποβάθμισής τους.

Στο πλαίσιο της διατριβής:

- Έγινε αποτίμηση των επιπτώσεων των πυρκαγιών στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

- Προτάθηκε τρόπος υπολογισμού της ελάχιστης απόστασης ασφαλείας σε περίπτωση πυρκαγιάς και των μέτρων περιορισμού των επιδράσεων της πυρκαγιάς.
- Προτάθηκε διαδικασία αξιολόγησης της κατάστασης συνθετικών μονωτήρων, που συνδυάζει την εφαρμογή διάφορων μακροσκοπικών και μικροσκοπικών διαγνωστικών τεχνικών. Η προτεινόμενη διαδικασία επιτρέπει την αξιολόγηση της κατάστασης μονωτήρα ακόμη και στην περίπτωση που δεν υπάρχουν διαθέσιμες κρίσιμες πληροφορίες σχετικά με την αρχική σύνθεση του πολυμερικού υλικού.

Το ερευνητικό αντικείμενο της μεταπτυχιακής διατριβής έχει στενή συνάφεια με τη βιομηχανική πρακτική. Τα αποτελέσματα της κρίνονται ιδιαιτέρως χρήσιμα για την αποσαφήνιση των μέτρων ασφαλείας στην περίπτωση κατάσβεσης πυρκαγιάς πλησίον των εναέριων γραμμών μεταφοράς, των ενεργειών που πρέπει να εφαρμόζονται από τον διαχειριστή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας προκειμένου να περιοριστούν οι επιπτώσεις της πυρκαγιάς στο σύστημα μεταφοράς καθώς και για την κατανόηση των μηχανισμών υποβάθμισης των μονωτήρων από την πυρκαγιά.

Τέλος στο πλαίσιο της διατριβής εκπονήθηκαν οι ακόλουθες εργασίες οι οποίες παρουσιάστηκαν σε διεθνή συνέδρια:

- N. Mavrikakis, K. Siderakis, E. Koudoumas, M. Sfakiotakis, G. Georgousis, E. Hontzopoulos, S. Couris, D. Anglos : “Power-LIBS: A novel technology for remotely assessing the condition of composite HV insulators”, 14th DEMSEE, Deregulated Electricity Market issues in South-Eastern Europe, June 20-21, 2022, Heraklion, Crete.
- N.. Mavrikakis, S.Kouroupakis, K. Siderakis, E. Koudoumas, G. Alexakis , J. Fasoulas , M. Sfakiotakis: “Utilising UAV Technology for Aerial Inspection of Crete's Transmission System: Current Applications and Future Perspectives”, 15th DEMSEE, Deregulated Electricity Market issues in South-Eastern Europe, June 26-27, 2023, Heraklion, Crete.
- N. Mavrikakis, K. Siderakis, K. Mouratis , E. Koudoumas, G. Kantemiris, S. Couris, O. Kokkinaki and D. Anglos “Implementation of FTIR and LIBS analysis techniques for identifying the ageing of outdoor composite insulators”, 15th DEMSEE, Deregulated Electricity Market issues in South-Eastern Europe, June 26-27, 2023, Heraklion, Crete.
- N. C. Mavrikakis, K. Siderakis, K. Mouratis and E. Koudoumas: “Condition assessment of 150 kV outdoor composite insulators following a vegetation fire event”, 23rd International Symposium on High Voltage Engineering, 28 August– 1 September 2023, Glasgow, Scotland, UK.
- N. Mavrikakis, K. Siderakis, K. Mouratis , and E. Koudoumas,”Ageing of a silicone rubber insulator caused by the inclined plane test”, 15th International Conference on Physics of Advanced Materials, November 19 – 26, 2023, in Sharm El Sheikh, Egypt.

5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Ως συνέχεια της ερευνητικής δραστηριότητας στο γνωστικό αντικείμενο της παρούσας διατριβής προτείνονται τα κάτωθι:

- Αποτίμηση της εφαρμογής των μέτρων πυροπροστασίας στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας σύμφωνα με την πρόσφατη νομοθεσίας σχετικά με τα μέτρα πυροπροστασίας στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας (Άρθρο 32, Νόμος 5075/2023 ΦΕΚ 206/ Τεύχος Α).
- Καταγραφή των σφαλμάτων λόγω πυρκαγιάς στο δίκτυο μεταφοράς της Ελλάδας.
- Αν άπτυξη πειραματικής διάταξης για την μελέτη της υποβάθμισης της μόνωσης του άερα σε συνθήκες πυρκαγιάς.