

# Χρήση συνθετικών πολυμερικών υλικών σε δίκτυα υψηλής τάσης για την αντιμετώπιση του προβλήματος της ρύπανσης των μονωτήρων



του Δρ. Κυριάκου Σιδεράκη

## Εισαγωγή

Τα δίκτυα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας απαρτίζονται κυρίως από υπαίθριες εγκαταστάσεις υψηλής τάσης, όπως οι υποσταθμοί και οι γραμμές μεταφοράς. Στις εγκαταστάσεις αυτές, βασική συνιστώσα μόνωσης είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας, ο οποίος προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, με κυριότερο το μηδενικό κόστος χρήσης. Έτσι, είναι επιβίβη και οικονομικά αποδεκτή, η κατασκευή

εγκαταστάσεων με τάση λειτουργίας που φθάνει σήμερα μέχρι και τα 1000kV.

Εκτός όμως από τον ατμοσφαιρικό αέρα, απαιτείται η χρήση και μονωτήρων, δηλαδή διατάξεων από στερεά διηλεκτρικά. Οι μονωτήρες εξασφαλίζουν τη διαμόρφωση των απαραίτητων διακένων αέρος, αναλαμβάνοντας την υποστήριξη ή την ανάρτηση των αγωγών υψηλής τάσης. Αποτελούν τη δεύτερη συνιστώσα του μονωτικού συστήματος, η οποία όμως πρέπει σε κάθε περίπτωση να λειτουργεί αξιόπιστα, δεδομένου ότι αρκεί η αστοχία ενός μόλις μονωτήρα για να τεθεί εκτός λειτουργίας ένα τμήμα ενός δικτύου ή και ένα δίκτυο συνολικά. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη το ηλεκτρικό και το μηχανικό έργο ενός μονωτήρα, αλλά και το γεγονός ότι μια υπαίθρια εγκατάσταση είναι εκτεθειμένη στην επίδραση του περιβάλλοντος, διατίθενται διάφοροι τύποι μονωτήρων σε σχέση με το υλικό κατασκευής, τη γεωμετρία και το πρόσθετο έργο που αναλαμβάνουν.



Σχήμα 1. Μονωτήρες ανάρτησης σε Γραμμή Μεταφοράς 150kV του Συστήματος Κρήτης

Η βασική διάκριση αφορά το υλικό κατασκευής, όπου υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες: οι κεραμικοί, αυτοί δηλαδή που έχουν κέλυφος κατασκευασμένο από πορσελάνη ή γυαλί και οι μη κεραμικοί, όπου το κέλυφος κατασκευάζεται από συνθετικά υλικά, όπως το Silicone Rubber. Η πρώτη κατηγορία χρησιμοποιείται ήδη από τα πρώτα βήματα ανάπτυξης των δικτύων υψηλής τάσης και μέχρι και τη δεκαετία του 1990 αποτελούσε τη συνήθη επι-

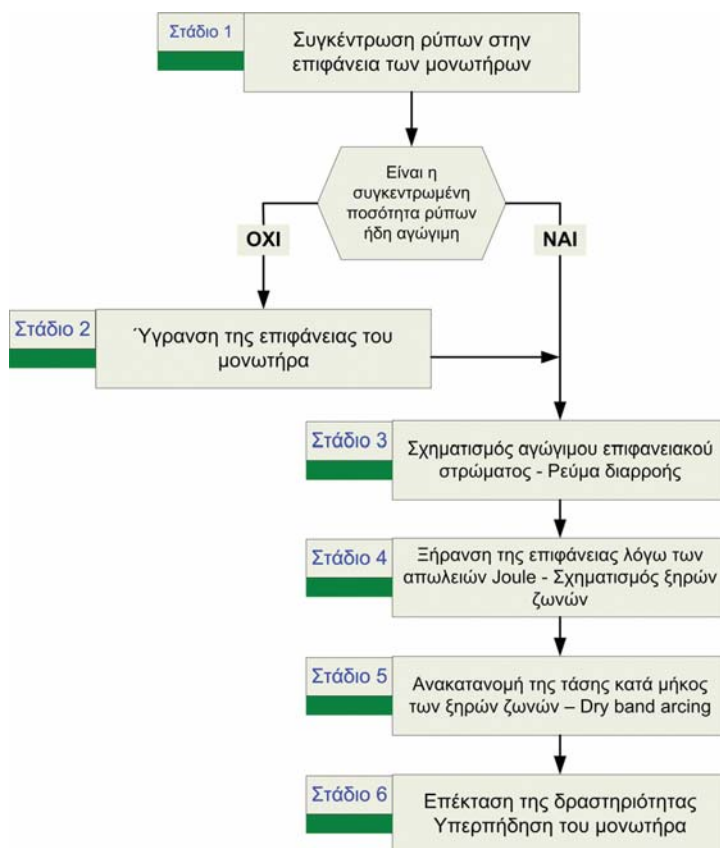
λογή. Η δεύτερη κατηγορία διατέθηκε στην αγορά στα τέλη της δεκαετίας του 1960, κυρίως με σκοπό τη μείωση του βάρους των μονωτήρων, έγινε όμως αποδεκτή από τις ηλεκτρικές εταιρίες τα τελευταία 10 με 15 χρόνια, μετά από σημαντική ερευνητική δουλειά σε παγκόσμιο επίπεδο σε σχέση με τη διαχρονική απόδοση τους και κυρίως λόγω της καλύτερης συμπεριφοράς των μονωτήρων αυτών σε συνθήκες ρύπανσης.

### Το πρόβλημα της ρύπανσης των μονωτήρων.

Ο όρος ρύπανση στην περίπτωση των δικτύων υψηλής τάσης, χρησιμοποιείται για

να περιγράψει την υποβάθμιση της συμπεριφοράς των μονωτήρων, εξαιτίας της εναπόθεσης στην επιφάνεια τους ρύπων, που έχουν ή μπορεί να αποκτήσουν ηλεκτρική αγωγιμότητα. Κάτι τέτοιο μπορεί να μεταβάλλει πλήρως τη συμπεριφορά ενός μονωτήρα και να οδηγήσει σε αστοχία του, υπό ονομαστική τάση λειτουργίας. Πρόκειται για ένα δυσεπίλυτο πρόβλημα, το οποίο εν συντομία περιγράφεται στο διάγραμμα του σχήματος 2.

Στην Κρήτη συναντάται ιδιαίτερα έντονο πρόβλημα με τους μονωτήρες, ειδικά το διάστημα από τον Αύγουστο μέχρι και τον Οκτώβριο, που έχει συχνά ως αποτέλεσμα

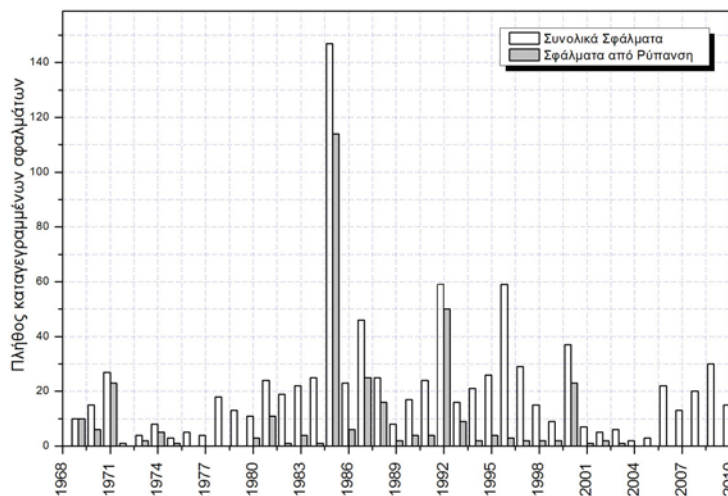


α)

β)

**Σχήμα 2.** (α) Η εξέλιξη του φαινομένου της ρύπανσης σε στάδια (β) Υπερπύδηση μονωτήρα πορσελάνης 150kV σε δοκιμή τεχνητής ρύπανσης, στο σταθμό δοκιμής μονωτήρων της ΔΕΗ Α.Ε. στα Λινοπεράματα

πολύωρες διακοπές τροφοδότησης και υποβάθμιση της ποιότητας παροχής των δικτύων. Αξίζει να σημειωθεί ότι για πολλά χρόνια αποτελούσε την κύρια αιτία σφαλμάτων στο δίκτυο μεταφοράς υψηλής τάσης του νησιού, όπως φαίνεται και από το γράφημα του σχήματος 3, απαιτώντας παράλληλα πολύ χρόνο και κόπο για τον έγκαιρο καθαρισμό των μονωτήρων (σχήμα 4).



**Σχήμα 3.** Σφάλματα στο Δίκτυο Μεταφοράς 66kV και 150kV της Κρήτης (συνολικά και λόγω ρύπανσης)

Από το 2000 όμως και μετά, η κατάσταση αυτή έχει αντιστραφεί, κάτι που οφείλεται αφενός στην εμπειρία που έχει αποκτηθεί από τη ΔΕΗ Α.Ε. σε επίπεδο Κρήτης, αλλά και κυρίως στη μαζική εισαγωγή νέων συνθετικών πολυμερικών υλικών.

**Υδρόφοβα συνθετικά υλικά**

Η αναβάθμιση της συμπεριφοράς των υπαίθριων μονώσεων, που επιτυγχάνεται με τη χρήση συνθετικών πολυμερικών υλι-

κών, αποδίδεται στις ιδιότητες της επιφάνειάς τους σε σχέση με το νερό. Τα υλικά αυτά, ως αποτέλεσμα της χημικής δομής τους, εμφανίζουν υδρόφοβη συμπεριφορά, η οποία διατηρείται και μετά την επικάλυψη ρύπων με υδρόφιλη συμπεριφορά, με το σχετικό μηχανισμό να αναλύεται παρακάτω. Έτσι, είναι αδύνατη η διαβροχή της επιφάνειας από νερό και επομένως καταστέλλεται η ανάπτυξη αγωγίμου επιφανειακού φιλμ, που αποτελεί προϋπόθεση για την εμφάνιση του προβλήματος της ρύπανσης.

Στην Κρήτη έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί υδρόφοβα πολυμερικά υλικά στα δίκτυα Μεταφοράς, τόσο στη μορφή μονωτήρων όσο και επικαλύψεων. Η πρώτη τοποθέτηση συνθετικού μονωτήρα έλαβε χώρα στα τέλη της δεκαετίας του 1970, με έναν περιορισμένο αριθμό μονωτήρων με βασικό υλικό το PTFE ή Teflon. Οι μονωτήρες αυ-



**Σχήμα 4.** Καθαρισμός Γραμμής Μεταφοράς 150kV του Συστήματος Κρήτης, υπό τάση, με ελικόπτερο



**Σχήμα 5.** Υδρόφοβη επιφανειακή συμπεριφορά σε μονωτήρα πορσελάνης με επικάλυψη από RTV SIR

τοί είχαν εξαιρετική συμπεριφορά ως προς τη ρύπανση, εμφάνισαν όμως προβλήματα μηχανικής ακεραιότητας του πυρήνα, τα οποία λύθηκαν σε επόμενες γενιές, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι κάποιοι από αυτούς είναι σε λειτουργία μέχρι και σήμερα. Η εφαρμογή όμως πολυμερικών υλικών σε μεγαλύτερη κλίμακα ξεκίνησε το 2000, τόσο με την τοποθέτηση μονωτήρων σε Γραμμές Μεταφοράς, όσο και επικαλύψεων σε υποσταθμούς.

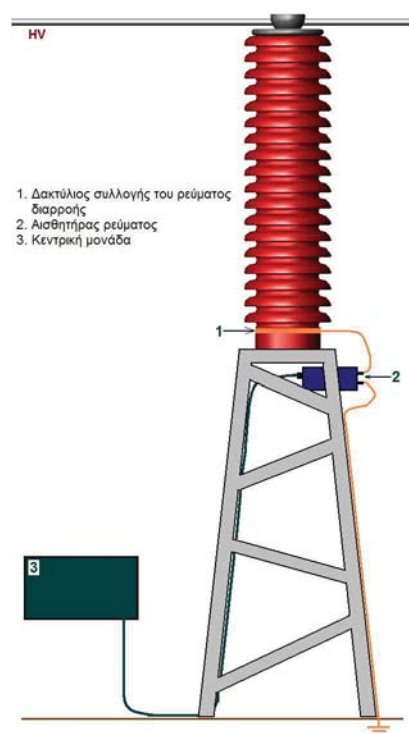
Ιδιαίτερα για τις επικαλύψεις, των υλικών δηλαδή που τοποθετούνται επί των κεραμικών μονωτήρων για να τους αποδώσουν υδρόφοβα χαρακτηριστικά (Σχήμα 5), αξίζει να σημειωθεί ότι στην Κρήτη έχει λάβει χώρα μια εξαιρετικά μεγάλης κλίμακας εφαρμογή (ΔΕΗ Α.Ε./Τ.Δ.Μ.Κρ. – Ρ. και Πανεπιστήμιο Πατρών, Καθηγητές Δ. Αγορής και Κ. Σιδεράκης), με την πλειοψηφία των υποσταθμών να είναι επικαλυμμένη σε ποσοστό 100%.

Ως αποτέλεσμα της υιοθέτησης των συνθετικών υλικών, έχουν περιοριστεί σημαντικά τα σφάλματα λόγω ρύπανσης καθώς και οι απαιτήσεις συντήρησης και καθαρισμού των μονωτήρων με σημαντικά οφέλη τόσο τεχνικά και οικονομικά, όσο και κοινωνικά.

## Μετρήσεις του ρεύματος διαρροής σε πραγματικές συνθήκες

Για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των πολυμερικών μονωτήρων στις συνθήκες της Κρήτης, πραγματοποιούνται συνεχώς από το 2000 μετρήσεις του επιφανειακού ρεύματος τους, το οποίο ονομάζεται ρεύμα διαρροής. Για το σκοπό αυτό, στο πλαίσιο της συνεργασίας της ΔΕΗ Α.Ε. με το Τμήμα Ηλεκτρολογίας του ΤΕΙ Κρήτης (Δρ. Κ. Σιδεράκης, Δρ. Ε. Δρακάκης) και

το Πανεπιστήμιο Πατρών, έχουμε εγκαταστήσει κατάλληλα μετρητικά συστήματα σε

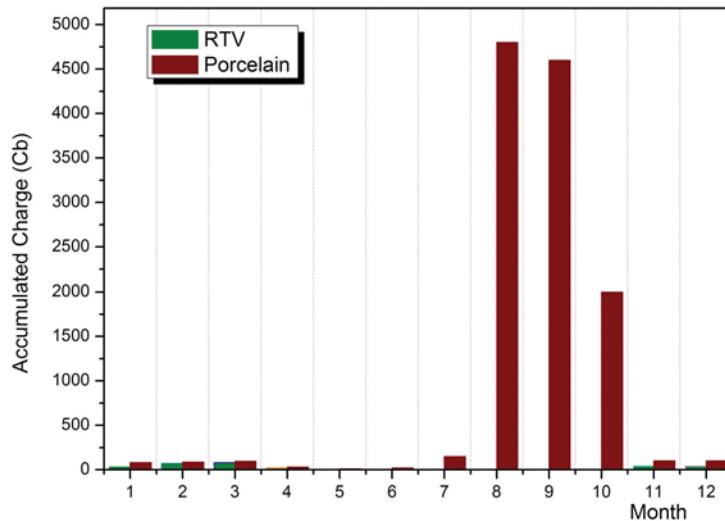


**Σχήμα 6.** Διάταξη συλλογής του ρεύματος διαρροής στην περίπτωση ενός μονωτήρα στηρίξεως.

εγκαταστάσεις 150kV στην Κρήτη, όπου διερευνάται η συμπεριφορά μονωτήρων διαφόρων τύπων και υλικών. Μια αναπαρασταση ενός τέτοιου συστήματος φαίνεται στο σχήμα 6, ενώ στο σχήμα 7 παρουσιάζονται τα μηνιαία επίπεδα επιφανειακής δραστηριότητας (Accumulated Charge), σε μονωτήρες πορσελάνης 150kV με ή χωρίς επικάλυψη από υδρόφοβο πολυμερικό υλικό RTV SIR. Είναι εμφανής η βελτίωση της συμπεριφοράς που επιτυγχάνεται με τη χρήση του πολυμερικού υλικού, για τους μήνες του καλοκαιριού όπου και παρατηρείται και το μεγάλο πρόβλημα. Αξίζει δε να σημειωθεί ότι οι υπό επιτήρηση μονωτήρες πορσελάνης έχουν καθαριστεί δύο φορές το υπόψη διάστημα, ενώ αυτοί με την επικάλυψη καμία.

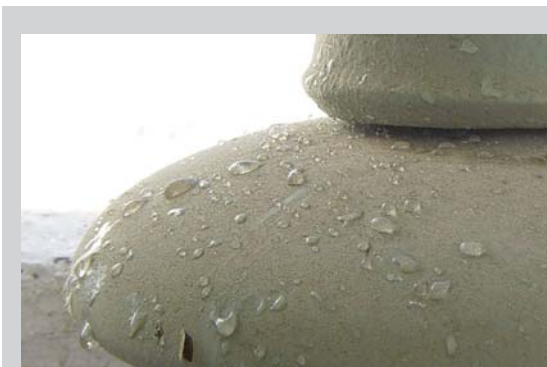
### Επιφανειακή υδροφοβία σε πραγματικές συνθήκες

Η διατήρηση της υδρόφοβης επιφανειακής συμπεριφοράς αποτελεί προϋπόθεση για την αποτελεσματική λειτουργία των πολυμερικών υλικών σε μονωτήρες. Δεδομένου ότι αυτή είναι αποτέλεσμα της



Σχήμα 7. Μέσο μηνιαίο συσσωρευμένο φορτίο σε μονωτήρες 150kV με και χωρίς επικάλυψη από RTV SIR

χημικής δομής των υπόψη υλικών, είναι αναμενόμενη η εμφάνιση μηχανισμών γήρανσης, ικανών να υποβαθμίσουν ή και να εξαλείψουν την υδρόφοβη ικανότητα. Ακόμη όμως και αν δεν συμβεί κάτι τέτοιο, η απώλεια της υδροφοβίας είναι αναμενόμενη κατά τη λειτουργία σε πραγματικές συνθήκες, αφού το στρώμα των ρύπων που θα προκύψει, έχει υδρόφιλη συμπεριφορά. Αυτό συνεπώς που ουσιαστικά ενδιαφέρει, δεν είναι απλά η επιφάνεια να έχει υδρόφοβα χαρακτηριστικά, αλλά να διατηρεί τα χαρακτηριστικά αυτά, όταν, εκτεθειμένη στο περιβάλλον, καλυφθεί από ένα υδρόφιλο στρώμα ρύπων (σχήμα 8).



Σχήμα 8. Μονωτήρας πορσελάνης τύπου cap and pin με επικάλυψη από RTV SIR, όπου διακρίνεται η υδρόφοβη συμπεριφορά παρά την παρουσία επιφανειακού στρώματος ρύπων

Η δυνατότητα μεταβολής της συμπεριφοράς του στρώματος των ρύπων από υδρόφιλη σε υδρόφοβη, αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του Silicone Rubber, στην οποία μάλιστα οφείλεται ως ένα βαθμό η επικράτηση του συγκεκριμένου υλικού σήμερα, σε εφαρμογές υπαίθριων μονώσεων. Ο μηχανισμός που κρύβεται πίσω από αυτήν, αφορά την κίνηση μορίων χαμηλού μοριακού βάρους του υλικού, από τον όγκο του προς την επιφάνεια, τα οποία στη συνέχεια διεισδύουν στο στρώμα των ρύπων.

Η κίνηση αυτή, όπως είναι αναμενόμενο, χαρακτηρίζεται από ένα πεπερασμένο χρόνο, γνωστός και ως χρόνος ανάκαμψης, δηλαδή το χρονικό διάστημα, από τη στιγμή που χάνεται η επιφανειακή υδροφοβία, λόγω της συγκέντρωσης των ρύπων, μέχρι ο μηχανισμός ανάκαμψης να επιτύχει εκ νέου υδρόφοβη συμπεριφορά. Ο χρόνος αυτός είναι ιδιαίτερα σημαντικός, δεδομένου ότι για το ενδιαμέσο χρονικό διάστημα, η επιφάνεια έχει υδρόφιλη συμπεριφορά και συνήθως κυμαίνεται από κάποιες ώρες μέχρι και ημέρες, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας και την κατάσταση του υλικού.

Ο ακριβής χρόνος ανάκαμψης εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, όπως:

- (α) την ποσότητα των μορίων χαμηλού μοριακού βάρους, η οποία καθορίζεται τόσο από την αρχική διαδικασία κατασκευής του υλικού όσο και από διάφορους μηχανισμούς, όπως οι εκκενώσεις corona, UV κ.α..
- (β) την ποιότητα των μορίων χαμηλού - μοριακού βάρους, αν δηλαδή η κύρια πολυμερική αλυσίδα είναι ευθύγραμμη ή κυκλική.
- (γ) τη θέση που έχουν τα μόρια χαμηλού μοριακού βάρους στον όγκο του υλικού, δεδομένου ότι όσο πιο μακριά είναι από την επιφάνεια, τόσο μεγαλύτερη απόσταση πρέπει να καλυφθεί,
- (δ) τη σύνθεση - δομή του υλικού, η

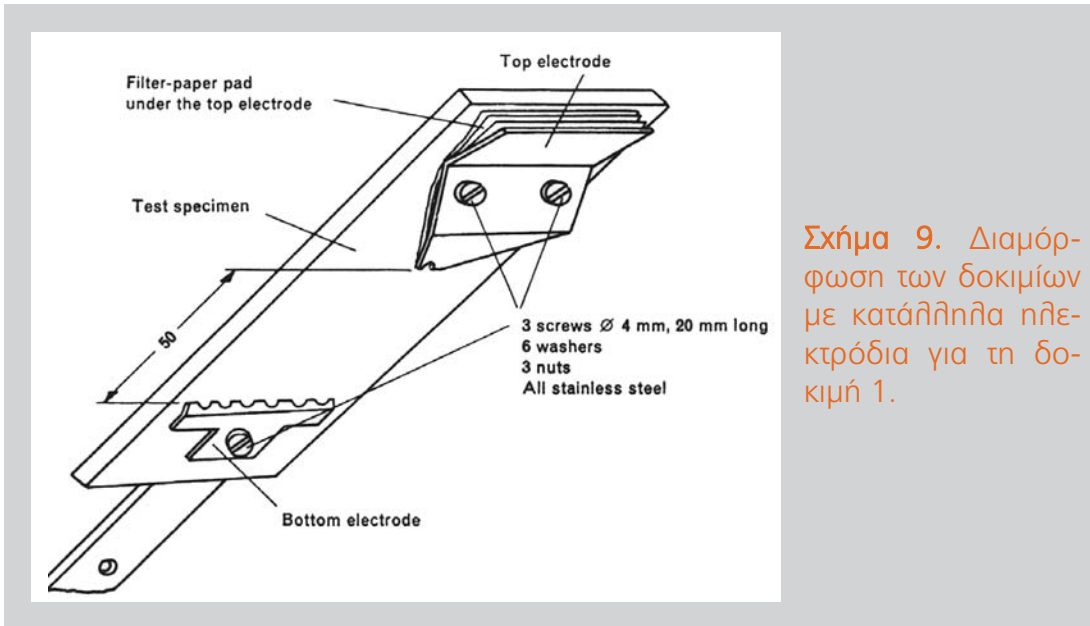
οποία καθορίζει την ευκολία κίνησης των μορίων προς την επιφάνεια,

- (ε) τη θερμοκρασία
- (στ) το είδος των ρύπων, δεδομένου ότι απαιτείται η διείσδυση και κίνηση των μορίων χαμηλού μοριακού βάρους στο επιφανειακό στρώμα των ρύπων.

### Αξιολόγηση της επιφανειακής υδροφοβίας στο εργαστήριο

Με στόχο τη διερεύνηση και αξιολόγηση της συμπεριφοράς των πολυμερικών υλικών σε μονωτήρες και ιδιαίτερα την επίδραση που έχουν στην απόδοση τους η δομή των υλικών και οι διάφοροι μηχανισμοί γήρανσης, απαιτείται η εργαστηριακή διερεύνηση της λειτουργικότητας των υλικών σε ελεγχόμενες συνθήκες. Στο πλαίσιο αυτό, αλλά και με βάση την ερευνητική συνεργασία που υπάρχει με τη ΔΕΗ Α.Ε. (Δρ. Κ. Σιδεράκης και Δρ. Ε. Δρακάκης), προετοιμάζονται σε εργαστηριακό χώρο του Τμήματος Ηλεκτρολογίας του ΤΕΙ Κρήτης, οι υποδομές για τη διενέργεια τεσσάρων τύπων εργαστηριακών δοκιμών, οι οποίες είναι:

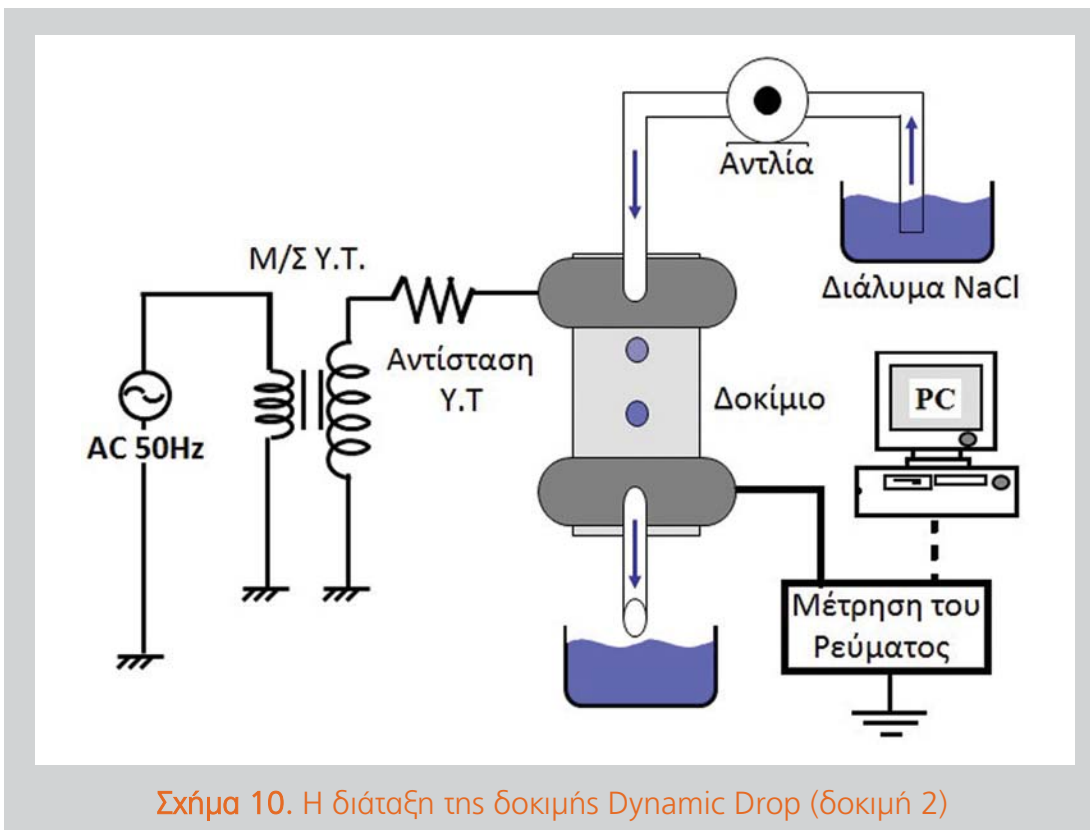
- **Δοκιμή 1: Δοκιμή του κεκλιμένου επιπέδου**  
Σκοπός της δοκιμής αυτής, είναι η αξιολόγηση της αντοχής των υλικών σε επιφανειακή ηλεκτρική δραστηριότητα, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ανάπτυξη αγωγίμων καναλιών άνθρακα (tracking) και σε διάβρωση (erosion). Τα υλικά δοκιμάζονται σε μορφή πηλακιδίου, στο οποίο προσαρμόζονται κατάλληλα ηλεκτρόδια (σχήμα 9), όπου διοχετεύεται διάλυμα ηλεκτρολύτη κατάλληλης αγωγιμότητας. Παράμετρος αξιολόγησης είναι το επιφανειακό ρεύμα διαρροής.
- **Δοκιμή 2: Δοκιμή Dynamic Drop**  
Η δοκιμή Dynamic Drop υλοποιείται με σκοπό τη διερεύνηση της ευστάθειας της επιφανειακής υδροφοβίας, υπό ηλεκτρική καταπόνηση και παρουσία ηλεκτρολύτη. Στην περίπτωση αυτή επί-



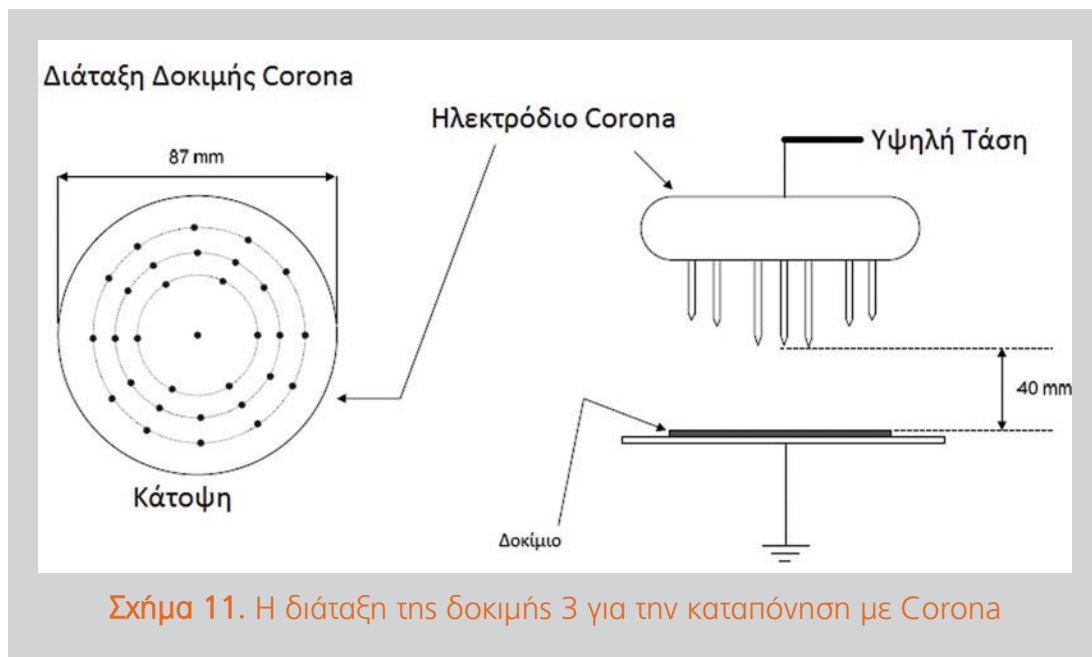
Σχήμα 9. Διαμόρφωση των δοκιμίων με κατάλληλα ηλεκτρόδια για τη δοκιμή 1.

σης, τα υλικά τίθενται σε δοκιμή υπό τη μορφή πηλακιδίου, αλλά χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια άλλου τύπου, σε σχέση με την δοκιμή 1, ενώ αλλάζει και

ο τρόπος παροχής του ηλεκτρολύτη (σχήμα 10). Παράμετρος αξιολόγησης και στην περίπτωση αυτή είναι το επιφανειακό ρεύμα διαρροής.



Σχήμα 10. Η διάταξη της δοκιμής Dynamic Drop (δοκιμή 2)



Σχήμα 11. Η διάταξη της δοκιμής 3 για την καταπόνηση με Corona

- Δοκιμή 3: Καταπόνηση Corona**  
 Το φαινόμενο corona έχει σημαντικό ρόλο, καθώς είναι σίγουρο ότι στην επιφάνεια των υλικών θα αναπτυχθούν εκκενώσεις αυτού του τύπου, εξαιτίας της παραμόρφωσης του ηλεκτρικού πεδίου που προκαλείται από τις σταγόνες του νερού (υδροφοβή επιφάνεια). Για την εργαστηριακή διερεύνηση της επίδρασης corona, η καταπόνηση των υλικών υλοποιείται χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδιο κατάλληλης γεωμετρίας, ενώ και στην περίπτωση αυτή τα υλικά καταπονούνται υπό μορφή πηλακιδίου. Παράμετρος αξιολόγησης στην περίπτωση αυτή είναι η ενέργεια που τροφοδοτείται στην εκκένωση
- Δοκιμή 4: Μελέτη του ρυθμού ανάκαμψης με την εφαρμογή πρότυπου ρύπου**  
 Ο ρυθμός ανάκαμψης της υδροφοβίας είναι μια ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος. Αξιολογείται καλύπτοντας την επιφάνεια με έναν πρότυπο ρύπο και στη συνέχεια, μετρώντας την επιφανειακή υδροφοβία σε τακτά χρονικά διαστήματα.

Οι παραπάνω τεχνικές αποτελούν αυτόνομες εργαστηριακές δοκιμές. Ο συνδυασμός τους όμως επιτρέπει τη συνολική αξιολόγηση της επιφανειακής συμπεριφοράς των υλικών σε συνθήκες ρύπανσης. Παράλληλα, σε συνεργασία με το διατμηματικό εργαστήριο της ΣΤΕΦ του ΤΕΙ Κρήτης «Κέντρο Τεχνολογίας Υλικών και Φωτονικής», υπάρχει η δυνατότητα πραγματοποίησης και εξειδικευμένων μετρήσεων σε επίπεδο υλικών, όπως μετρήσεις φασματοσκοπίας (UV και FTIR), μετρήσεις στοιχειακής ανάλυσης EDX (Energy Dispersive X-ray Analysis), μετρήσεις μορφολογίας επιφάνειας SEM και χαρακτηρισμός επιφανειακής υδροφοβίας.