

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΛΟΠΟΝΗΣΟΥ ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**Διπλωματική Εργασία της φοιτήτριας του Τμήματος  
Ηλεκτρολόγων Μηχανικών**

**ΛΑΜΠΡΟΥ ΜΑΡΙΑ**

Αριθμός Μητρώου: 7471

**Θέμα**

**«Μελέτη επίδρασης του νανοσωματιδίου  $Al_3O_2$  στη τάση  
διάσπασης του ελαίου φυτικού εστέρα»**

**Επιβλέπων καθηγητής : Χαραλαμπάκος Βασίλειος Νεκτάριος**

**Αριθμός Διπλωματικής:**

Πάτρα, (Φεβρουάριος, 2023)

## Περιεχόμενα

ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	3
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο.....	5
1.1ΦΥΤΙΚΑ ΕΛΑΙΑ.....	5
1.1.2ΕΙΔΗ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΦΥΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ.....	6
1.1.3ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΦΥΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ.....	7
1.1.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΦΥΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ ΣΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ .....	8
1.2 ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΓΡΑ - ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΛΑΔΙΑ .....	8
1.2.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ .....	9
1.2.2ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ .....	11
1.3ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑ-ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ.....	12
1.3.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.....	12
1.3.2ΔΙΑΜΟΡΙΑΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΤΩΝ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.....	13
1.3.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΝΑΝΟΕΛΑΙΩΝ .....	15
1.3.4ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ .....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο.....	17
2.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ .....	17
2.1.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑC ΤΑΣΗΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΦΥΤΙΚΟΥ ΕΛΑΙΟΥ .....	17
2.2: ΚΡΟΥΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ .....	19
2.3 ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΝΑΝΟΕΛΑΙΩΝ AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ΣΕ ΜΟΝΩΤΙΚΟ ΕΛΑΙΟ FR3 ΣΕ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ 0.002% W/W ΚΑΙ 0.016% W/W. ....	21
2.4ΠΙΝΑΚΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	25
2.4.2ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΣΗΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΝΑΝΟΕΛΑΙΟΥ 0,016%W/W .....	27
2.4.3ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΣΗΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΝΑΝΟΕΛΑΙΟΥ 0,0002%W/W.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο.....	33
3.1ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ .....	33
3.1.1ΜΕΤΡΗΣΗ ΑC ΤΑΣΗΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΝΑΝΟΕΛΑΙΟΥ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ 0,016% AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ΚΑΙ FR3 .....	34
3.1.2ΜΕΤΡΗΣΗ ΑC ΤΑΣΗΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΝΑΝΟΕΛΑΙΟΥ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ 0,002% AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ΚΑΙ FR3 .....	36
3.1.3ΜΕΤΡΗΣΗ ΑC ΤΑΣΗΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΦΥΤΙΚΟΥ ΕΛΑΙΟΥ FR3 .....	37
3.2.....	38
ΣΧΟΛΙΑ -ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ: .....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	40

**ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ** είναι να εξεταστεί η διηλεκτρική αντοχή του λαδιού φυτικού εστέρα FR3 σε θερμοκρασία δωματίου , με αφύγρανση στους 90°C και με την επίδραση των νανοσωματίδιων του  $Al_2O_3$  σε συγκέντρωση 0.002%w/w και 0.016w/w . Τέλος, εξετάζεται το φαινόμενο φορτίο των δύο τελευταίων διαλυμάτων. Στο 1 ο Κεφάλαιο έχουμε εισαγωγή σε διηλεκτρικά υλικά και αναφέρονται τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες τους ώστε τα υλικά να χαρακτηρίζονται ως μονωτές. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στα μονωτικά που βρίσκονται σε υγρή μορφή και πιο συγκεκριμένα σε έλαια που συνηθίζονται να χρησιμοποιούνται σε τριφασικούς κυρίως μετασχηματιστές και στο μηχανισμό διάσπασης στη συνέχεια παρουσιάζεται η υγρή μόνωση με τη νανοτεχνολογία. Στο 2 ο Κεφάλαιο αναλύεται η πειραματική διάταξη και διαδικασία που ακολουθήσαμε. Εξηγείται η πειραματική διαδικασία , τα όργανα που έγιναν οι μετρήσεις και η διαδικασία για να προετοιμαστούν τα νανοέλαια και αντίστοιχα το πρωτόκολλο των μετρήσεων. Στο 3ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα και γίνεται η στατιστική ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Τέλος, παρουσιάζονται αναλυτικά τα συμπεράσματα που έχουν προκύψει από την πειραματική διαδικασία μέσω γραφικών παραστάσεων.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα πρώτα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) εμφανίστηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1880. Έκτοτε, αυξήθηκαν δραστικά σε μέγεθος και πολυπλοκότητα με τις απαιτήσεις για αξιόπιστη και φτηνή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας να κορυφώνεται τα τελευταία χρόνια. Ένας κρίσιμος παράγοντας που εξασφαλίζει την αξιοπιστία και την εξοικονόμηση ενέργειας στα ΣΗΕ είναι η μόνωση όλων των στοιχείων που τα απαρτίζουν. Η ζητούμενη μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ενέργειας με ελάχιστες απώλειες, οδηγεί στη λειτουργία του εξοπλισμού σε όλο και υψηλότερα επίπεδα τάσης γεγονός που εντείνει την ανάγκη ανάπτυξης μονωτικών υλικών με βελτιωμένα μονωτικά και θερμικά χαρακτηριστικά. Το σύνολο του εξοπλισμού μόνωσης υψηλής τάσης σε ενεργειακά συστήματα κατηγοριοποιείται συνοπτικά στις εξής κατηγορίες:

- Αέρια μόνωση (π.χ. ατμοσφαιρικός αέρας, SF<sub>6</sub> )
- Υγρή μόνωση (π.χ. πετρελαϊκό έλαιο, φυσικός εστέρας, συνθετικός εστέρας )
- Στερεά μόνωση (π.χ. γυαλί, πορσελάνη, χαρτί, πολυαιθυλένιο )

Οι τριφασικοί μετασχηματιστές αποτελούν το πλέον νευραλγικό στοιχείο του συστήματος, διότι μεταφέρουν ενέργεια και μετασχηματίζουν την τάση σε διαφορετικά επίπεδα ανάλογα με τις ανάγκες του. Η υγρή μόνωση που περιέχουν λειτουργεί παράλληλα ως ψυκτικό μέσο. Όταν η θερμική αγωγιμότητα των μονωτικών υγρών είναι χαμηλή είναι πιθανό να εμφανιστούν θερμικές βλάβες, λόγω στιγμιαίας υπερφόρτωσης. Σύμφωνα με τα διαθέσιμα στατιστικά δεδομένα, η ζωή των μετασχηματιστών με βλάβη, που οφείλεται σε αστοχία της μόνωσης, κυμαίνεται στα 17,8 χρόνια, διάρκεια που είναι σχεδόν η μισή της αναμενόμενη των 35-40 ετών . Η λειτουργική αξιοπιστία και ο χρόνος ζωής των μετασχηματιστών εξαρτάται ως επί το πλείστον από τα χαρακτηριστικά και την κατάσταση της υγρής μόνωσης. Η ανάπτυξη λοιπόν νέων μονωτικών μεθόδων με υψηλότερη διηλεκτρική αντοχή και βελτιωμένα θερμικά χαρακτηριστικά θα οδηγήσει σε μετασχηματιστές με μικρότερο μέγεθος, χαμηλότερο κόστος και αυξημένη αξιοπιστία. Προς αυτή την κατεύθυνση έχει ξεκινήσει πρόσφατα η ανάπτυξη υγρών νανοδιηλεκτρικών (νανοέλαια), προσθέτοντας στα κοινά διηλεκτρικά λαδιά μικρές συγκεντρώσεις νανοσωματιδίων. Η πρακτική αυτή έχει οδηγήσει σε ορισμένες περιπτώσεις στη δημιουργία νανοελαίων με αυξημένη τάση διάσπασης και θερμική αγωγιμότητα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

### 1.1 ΦΥΤΙΚΑ ΕΛΑΙΑ

Ο μηχανισμός με τον οποίο συμβαίνει ηλεκτρική διάσπαση του μονωτικού λαδιού δεν είναι τελείως σαφής. Οι δύο επικρατούσες υποθέσεις είναι η διάσπαση από ιονισμό και η θερμική διάσπαση, και οι δύο προϋποθέτουν την ύπαρξη φυσαλίδων αέρα. Οι διαδικασίες μέσω των οποίων σχηματίζονται φυσαλίδες περιλαμβάνουν θυλάκια αέρα στην επιφάνεια ηλεκτροδίων, μεταβολές θερμοκρασίας και πίεσης, αποσύνθεση προϊόντων μέσω ηλεκτρονικών κρούσεων δίνοντας αφορμή για τον σχηματισμό αέριων προϊόντων, εξάτμιση υγρού από εκκενώσεις τύπου Corona σε ακίδες και ανωμαλίες επί των ηλεκτροδίων. Όσον αφορά την υπόθεση του ιονισμού, μόλις το ηλεκτρικό πεδίο μέσα σε μια φυσαλίδα λάβει μια ορισμένη τιμή, ο αέρας που περιέχει ιονίζεται. Στις παρυφές της ιονισμένης φυσαλίδας παρουσιάζεται ενίσχυση του ηλεκτρικού πεδίου με αποτέλεσμα τον ιονισμό του παρακείμενου λαδιού ο οποίος τελικά εξελίσσεται σε πλήρη διάσπαση. Κατά την υπόθεση της θερμικής διάσπασης, το λάδι που περιβάλλει την ιονισμένη φυσαλίδα θερμαίνεται και όταν φθάσει τη θερμοκρασία βρασμού η φυσαλίδα διογκώνεται, εκτοπίζει το λάδι και έτσι η διάσπαση επέρχεται μέσα σε ατμούς λαδιού που έχουν σημαντικά χαμηλότερη διηλεκτρική αντοχή από το ίδιο το λάδι. Στον μηχανισμό της διάσπασης όμως φαίνεται ότι παίζει σημαντικό ρόλο και η παρουσία αιωρημάτων. Μέσα σε ένα μονωτικό λάδι είναι δυνατόν να υπάρχουν ξένα σωματίδια-σκόνη, μεταλλικά ή μονωτικά σωματίδια-τα οποία υποβαθμίζουν την ποιότητα του λαδιού, μειώνοντας τη διηλεκτρική του αντοχή. Επίσης, τα αιωρήματα αυτά απορροφούν υγρασία που μειώνει περισσότερο τη διηλεκτρική αντοχή, λάδια που περιέχουν αιωρήματα είναι πιο ευαίσθητα στην παρουσία υγρασίας. Ας θεωρήσουμε ένα σφαιρικό σωματίδιο ακτίνας  $r$  και διαπερατότητας  $\epsilon$  να αιωρείται σε διηλεκτρικό υγρό διαπερατότητας  $\epsilon_{liq}$ . Τότε, εντός ενός πεδίου το σωματίδιο θα πολωθεί και θα υποστεί μια δύναμη που δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$F_e = \epsilon_{liq} 3 E \text{ grade} .$$

Αυτή η δύναμη κατευθύνεται προς τη θέση μέγιστης έντασης αν  $\epsilon > \epsilon_{liq}$ . Έτσι, η δύναμη ωθεί το σωματίδιο να κινηθεί στην περιοχή όπου το πεδίο είναι ισχυρότερο. Σε ένα διάκενο ομοιόμορφου πεδίου, ή διάκενο σφαιρών μικρού μήκους, το ισχυρότερο πεδίο είναι στην ομοιόμορφη περιοχή. Σε αυτή την περιοχή η ποσότητα  $\text{grad}E$  ισούται με μηδέν, έτσι ώστε το σωματίδιο παραμένει εκεί σε ισορροπία. Συνεπώς τα σωματίδια σύρονται στην περιοχή ομοιόμορφου πεδίου. Αν η διαπερατότητα του σωματιδίου είναι υψηλότερη από αυτή του μέσου, τότε η παρουσία του στην περιοχή ομοιόμορφου πεδίου επιφέρει συγκέντρωση ηλεκτρικής ροής στην επιφάνειά του και επιπλέον σωματίδια θα ελκυσθούν στην περιοχή υψηλότερης συγκέντρωσης ροής. Ένας ακόμα μηχανισμός διάσπασης έχει να κάνει με την ηλεκτρονική διάσπαση. Η θεωρία της ηλεκτρονικής (ή ενδογενούς ή εγγενούς) διάσπασης αφορά μονωτικά λάδια που δεν είναι μίγματα και από τα οποία έχουν απομακρυνθεί ξένα αιωρήματα και φυσαλίδες αέρα ή υγρασίας. Ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από την κάθοδο, καθώς επιταχύνονται λόγω του επιβαλλόμενου πεδίου, συγκρούονται με μόρια του υγρού και τα ιονίζουν. Με τον τρόπο αυτό σχηματίζονται ταχέως αναπτυσσόμενες 20 στιβάδες

ηλεκτρονίων αυξάνοντας την αγωγιμότητα του λαδιού και οδηγούν στην διάσπασή του για κάποια τιμή του πεδίου.

Τα φυτικά έλαια έχουν χρησιμοποιηθεί για αρκετές δεκαετίες σε διάφορα συστήματα, αρχικά ως μονωτικά υγρά σε πυκνωτές. Εκτός από την περιβαλλοντική τους συμβατότητα, τα φυσικά εστερικά έλαια παρουσιάζουν υψηλότερο σημείο ανάφλεξης, σε σύγκριση με τα ορυκτέλαια. Σήμερα, τα φυσικά εστερικά έλαια χρησιμοποιούνται κυρίως σε μετασχηματιστές μέσης τάσης ενώ οι ερευνητές διύλισαν πολλά πειραματικά δεδομένα σχετικά με τη διηλεκτρική αντοχή, τη σταθερότητα στη γήρανση, την απόδοση μεταφοράς θερμότητας, τη τάση αερίων και ούτω καθεξής αλλά και τη διάδοση streamer σε μεγαλύτερα κενά. Αρκετοί ερευνητές έχουν επικεντρωθεί στην τάση διάσπασης των φυσικών εστερολαίων ως μια βασική παράμετρος για το σχεδιασμό μετασχηματιστών ισχύος όπου η τάση διάσπασης των φυσικών εστερολαίων υπό εναλλασσόμενο ρεύμα, για ομοιογενές πεδίο και μικρή απόσταση κενού, όταν μετρήθηκε και μέσω στατιστικής έρευνας ο μέσος όρος ήταν η τάση διάσπασης και τα χαμηλότερα επίπεδα τάσης διάσπασης προσδιορίζεται για μια επιτυχημένη πρόβλεψη της μέσης και της χαμηλότερης τιμής ανάλυσης της τάσης από τη διασπορά των πειραματικών δεδομένων. Γι αυτό είναι υποχρεωτικό να υποθέσουμε ότι η τάση διάσπασης ακολουθεί μια ορισμένη κατανομή. Σε ορισμένες εργασίες, διαπιστώθηκε ότι τα δεδομένα ακολουθούν είναι καλύτερα στην κανονική κατανομή ενώ άλλοι συγγραφείς αναφέρουν ότι ο Weibull έχει πιο κατάλληλη. Ακόμη, το FR3 μελετήθηκε και συγκρίθηκε με την τάση διάσπασης του ορυκτέλαιο. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές διαμορφώσεις ηλεκτροδίων κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, ο Rogowski για ομοιόμορφο πεδίο, Rogowski-επίπεδο για σχεδόν ομοιόμορφα πεδία και σημείο-επίπεδο ηλεκτροδίων για ανομοιόμορφα υπό εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής τάσης. Ο σκοπός του, η χρήση αυτών των διαμορφώσεων ηλεκτροδίων για τη μελέτη της στατιστικής κατανομής της τάσης διάσπασης του υπομελετημένου διηλεκτρικού υγρού, όχι μόνο στην περίπτωση των ομοιογενών ηλεκτρικών πεδίων, αλλά και στην περίπτωση των αδύναμων και έντονα ανομοιογενών ηλεκτρικά πεδία, που εμφανίζονται αναπόφευκτα μέσα στους μετασχηματιστές, λόγω ο σχεδιασμός τους και η παρουσία ελαττωμάτων]. Ακόμα περισσότερο, ομοιόμορφα ηλεκτρικά πεδία (λόγω ατελειών ή ελαττωμάτων) στο εσωτερικό μετασχηματιστών προκαλούν την έναρξη του μοντέλου εκκένωσης φυσαλίδων, λόγω σε προϋπάρχουσες μικροφυσαλίδες μέσα στο λάδι, εξ ου και η μελέτη του. Τα προαναφερθέντα διαφορετικά ηλεκτρόδια έχουν μεγάλη σημασία για την συνάθροιση όλων των πιθανών σεναρίων. Εδώ επικεντρωθήκαμε για τον προσδιορισμό της μέσης και της χαμηλότερης τιμής τάσης, κατά συνέπεια, στη κανονική, στη Weibull, Gumbel και στη γενικευμένη, για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε η κατανομή ακραίων τιμών (GEV), αλλά και για να υπολογίσετε την πιθανότητα τάσης διάσπασης και να ελέγξετε την συμμόρφωση τάσης διάσπασης με τις προαναφερθείσες κατανομές.

### **1.1.2ΕΙΔΗ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΦΥΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ**

Ένα από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υγρά μονωτικά είναι το μονωτικό λάδι που προέρχεται από την απόσταξη του πετρελαίου. Τα πλέον διαδεδομένα είδη μονωτικών ελαίων είναι τα ορυκτέλαια, ενώ οι περισσότεροι μετασχηματιστές είναι κατασκευασμένοι να λειτουργούν με ορυκτέλαια. Το ορυκτέλαιο είναι συνήθως το μονωτικό υγρό αναφοράς

με το οποίο συγκρίνονται τα υπόλοιπα μονωτικά λάδια, αφού έχει μεγάλη διαθεσιμότητα και τον καλύτερο συνδυασμό τεχνικών χαρακτηριστικών-κόστους. Παρ' όλα αυτά, τα έλαια πετρελαϊκής βάσης δεν έχουν καλές επιδόσεις σε υψηλές θερμοκρασίες-χαμηλό σημείο ανάφλεξης, ενώ παρουσιάζουν χαμηλό ποσοστό βιοδιάσπασης. Στο παρελθόν ένα μεγάλο ποσοστό μετασχηματιστών χρησιμοποιούσαν χλωριωμένα συνθετικά υγρά αντί για ορυκτέλαιο, για λόγους περιορισμού των αναφλέξεων και των εκρήξεων. Αυτά τα υγρά τα οποία είχαν ως βάση το πολυχλωριωμένο διφαινύλιο ( $C_{12}H_5Cl_5$ ) γνωστό ως PCB, κυκλοφόρησαν στην αγορά με διάφορες εμπορικές ονομασίες. Η πιο διαδεδομένη είναι το Askarel αλλά υπάρχουν και άλλες όπως Clophen, Pyranol, Inerteen, Afcolin, Dielectrol, Nerolin, Rermitol. Αργότερα, η χρήση των PCB απαγορεύτηκε καθώς αποδείχθηκαν επιβλαβή για το περιβάλλον αλλά και τον άνθρωπο(καρκινογόνα). Έτσι αναπτύχθηκαν άλλα-μη τοξικά- μονωτικά έλαια όπως οι συνθετικοί εστέρες, σύνθετοι υδρογονάνθρακες, οι σιλικονούχοι υδρογονάνθρακες, τα λάδια συνθετικών υδρογονανθράκων και προσφάτως οι φυσικοί εστέρες(λάδια φυτικής προέλευσης). Αυτά χρησιμοποιούνται σε ειδικές περιπτώσεις και είναι 5-6 φορές ακριβότερα από τα κοινά ορυκτέλαια. Η ανάπτυξή τους σχετίζεται με την ανάγκη για ασφάλεια από φωτιά σε περίπτωση ανάφλεξης, καθώς επίσης για περιβαλλοντικούς λόγους. Ωστόσο αν και έχουν καταλληλότερη συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες, έχουν περιορισμένη απόδοση σε ιδιαίτερα ψυχρά κλίματα.

### **1.1.3.ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΦΥΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ**

Τις τελευταίες δυο δεκαετίες έχει ξεκινήσει η χρήση των φυσικών εστέρων στη μόνωση των ηλεκτρικών συστημάτων (μετασχηματιστές, διακόπτες, πυκνωτές). Είναι φυτικής προέλευσης (π.χ. από ελαιοκράμβη) και φιλικά προς το περιβάλλον, γεγονός που τα έχει κάνει τα τελευταία χρόνια περιζήτητα, αφού τα πετρελαϊκά έλαια προξενούν περιβαλλοντικά προβλήματα. Μερικές εξαιρετικές ιδιότητες των φυσικών εστέρων είναι η βιοδιασπασιμότητα, η απουσία τοξικότητας, η αντοχή τους σε υψηλές θερμοκρασίες ( $320^{\circ}C$ ), επηρεάζονται σε μικρότερο βαθμό από την υγρασία και είναι λιγότερο εύφλεκτα σε σχέση με τα πετρελαϊκά λαδιά. Αυτά τα χαρακτηριστικά τα καθιστούν πιθανούς αντικαταστάτες των πετρελαϊκών παρόλο που εμφανίζουν σχετικά μικρότερη διηλεκτρική αντοχή σε σχέση με τα ορυκτέλαια.

Τα μονωτικά έλαια παρουσιάζουν πλήθος πλεονεκτημάτων για τη χρήση τους ως μονωτικά υγρά. Αξιοσημείωτα είναι τα έλαια που προορίζονται για μετασχηματιστές και για διακόπτες η χρήση των οποίων προϋποθέτει καλές ηλεκτρικές ιδιότητες και ψυκτική ικανότητα με μεγάλο βαθμό απόδοσης. Ακόμα το λάδι των ελαιοδιακοπών πρέπει να αντέχει στα τόξα που γίνονται στο διακόπτη χωρίς τον κίνδυνο δημιουργίας εναποθέσεων. Το λάδι των πυκνωτών πρέπει να είναι τέλειο μονωτικό, για να μην έχουμε απώλειες και να αντέχει σε ψηλές τάσεις, δηλαδή να ελκύει όσο το δυνατόν λιγότερα αέρια (κυρίως υδρογόνο), ο ιονισμός των οποίων οδηγεί στη διάσπαση του μονωτικού. Τα χαρακτηριστικά κάθε λαδιού πρέπει να μένουν αναλλοίωτα επί μεγάλο χρονικό διάστημα και ιδίως στους μετασχηματιστές. Οι ιδιότητες των μονωτικών λαδιών διακρίνονται σε φυσικές, χημικές και ηλεκτρικές. Πάνω στο όλο θέμα, έχουν εκδοθεί αποδεκτές μέθοδοι από διάφορους διεθνείς οργανισμούς, όπως είναι ο διεθνής οργανισμός προτύπων (ISO) και IEC, καθώς και από εθνικούς οργανισμούς, όπως είναι ο BSI(Αγγλία), VDE(Γερμανία), ASTM, το ινστιτούτο πετρελαίου (IP) και από όμοιους οργανισμούς άλλων χωρών.

#### **1.1.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΦΥΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ ΣΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ**

Τα φυτικά λάδια-σαν διηλεκτρικά υγρά-αποτελούν μια πρωτοποριακή εναλλακτική λύση των πετρελαϊκών που χρησιμοποιούνται συνήθως στους μετασχηματιστές διανομής και ισχύος. Έχουν προτιμητέες περιβαλλοντικές ιδιότητες σε σύγκριση με το ορυκτέλαιο και ιδιαίτερα ταχεία και πλήρη βιοαποικοδόμηση. Τα φυτικά διηλεκτρικά υγρά αποτελούν μια πρόσφατη προσθήκη στην κατηγορία των λιγότερο εύφλεκτων διηλεκτρικών υγρών. Γενικά, ως λιγότερο εύφλεκτα διηλεκτρικά χαρακτηρίζονται εκείνα με υψηλό σημείο ανάφλεξης και εισήχθησαν στα μέσα της δεκαετίας του '70 ως εναλλακτικές λύσεις του Askarel για εγκαταστάσεις που απαιτούν υψηλό βαθμό πυρασφάλειας. Πρώτα ήταν οι υδρογονάνθρακες υψηλού μοριακού βάρους (HMWH) και οι σιλικόνες που ακολούθησαν τη δεκαετία του 1980 με συνθετικά υγρά όπως οι πολυαλφαλεφίνες (ΡΑΟ) και οι πολυεστέρες (ΡΟΕ). Από αυτά οι ΡΟΕ έχουν τις ελκυστικότερες περιβαλλοντικές ιδιότητες, ωστόσο το σχετικά υψηλό κόστος τους οδήγησε στην αναζήτηση πιο προσιτών εναλλακτικών λύσεων. Τα φυτικά λάδια (π.χ. από κράμβη, σόγια, ηλίανθο) ή φυσικοί εστέρες είναι χημικώς όμοιοι με τις ΡΟΕ και μοιράζονται πολλές από τις ιδιότητές τους. Οι φυσικοί εστέρες έχουν εξαιρετικές περιβαλλοντικές ιδιότητες, υψηλό βαθμό πυρασφάλειας και δείχνουν ότι επιβραδύνουν την υποβάθμιση μόνωσης χαρτιού. Εμπορικά διαθέσιμα από τα τέλη της δεκαετίας του 1990 σε μετασχηματιστές διανομής, τώρα αρχίζουν να βλέπουν τη χρήση τους και σε μετασχηματιστές ισχύος. Η εφαρμογή φυτικών ελαίων σε ηλεκτρικά συστήματα επεκτείνεται πέρα από τα όρια των λιγότερο εύφλεκτων υγρών, σε εφαρμογές που συνήθως χρησιμοποιείται ορυκτέλαιο. Τα τελευταία 20 χρόνια χρησιμοποιούνται οι φυσικοί εστέρες για μόνωση μετασχηματιστών ή πυκνωτών ή διακοπών. Είναι φιλικό στο περιβάλλον σε αντίθεση με τα πρώτα που το μολύνουν. Σημαντικό είναι η έλλειψη τοξικότητας και η αντοχή τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Είναι αρκετά λιγότερο εύφλεκτοι άρα δεν υπάρχει κίνδυνος ανάφλεξης στην ηλεκτρολογική εγκατάσταση. Η υγρασία δεν τα επηρεάζει τόσο και αυτό είναι ίσως και το σημαντικότερο κομμάτι. Οι εστέρες που είναι συνθετικοί είναι έλαια που έχουν προέλευση πετρελαϊκή που παράγεται από πολυεστέρες. Ο βαθμός βιοδιάσπασης είναι ιδιαίτερα υψηλός σε σχέση με τα πετρελαϊκά και το σημείο τήξης είναι χαμηλό όπως και το ιξώδες. Η διηλεκτρική αντοχή είναι βελτιωμένη σε ένα βαθμό οπότε και οι μονωτικές ιδιότητες είναι καλές και αντίστοιχα η θερμική αγωγιμότητα. Το γεγονός ότι είναι λιγότερο εύφλεκτοι συμβάλει ως πλεονέκτημα αν και τα συστήματα ψύξης και ασφάλειας δεν μπορούν να παραληφθούν. Μοναδικό μειονέκτημα είναι πως το κόστος τους είναι υψηλό οπότε αποφεύγεται να χρησιμοποιείται σε μετασχηματιστές.

## **1.2 ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΓΡΑ - ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΛΑΔΙΑ**

Τα μονωτικά έλαια είναι εκ των σημαντικότερων διηλεκτρικών υγρών και έχουν ευρεία χρήση σε ηλεκτρολογικούς εξοπλισμούς, με σημαντικότερη τη χρήσης τους στους μετασχηματιστές. Σε κανονικές συνθήκες έχουν αρκετά μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή, σε σχέση με τα αυτή του αέρα (21 kV/cm για τον αέρα, 60-200 kV/cm για μονωτικά έλαια μετασχηματιστών). Η σημασία τους στις ηλεκτροτεχνικές κατασκευές είναι μεγάλη, γιατί διαθέτουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:



- Υψηλή διηλεκτρική αντοχή, ώστε να υπάρχει αντίσταση στη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος.
- Μικρό ιξώδες, ώστε να ρέουν ευκολότερα ακόμη και σε χαμηλές θερμοκρασίες.
- Μεγάλο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, ώστε να διευκολύνουν την απαγωγή θερμότητας, η οποία δημιουργείται στους αγωγούς, τις επαφές διακοπών, τους πυρήνες και τα τυλίγματα μετασχηματιστών.
- Καθαρότητα, ώστε να μην περιέχονται σωματίδια που θα μπορούσαν να καταστρέψουν το σύστημα μόνωσης. Η διηλεκτρική αντοχή των μονωτικών ελαίων εξαρτάται, όπως εκείνη των αερίων και στερεών μονωτικών, από τη διάταξη των ηλεκτροδίων και τη μορφή της τάσης: Όσο περισσότερο ανομοιογενές είναι το πεδίο, τόσο μειώνεται η τάση διάσπασης.
- Η διηλεκτρική αντοχή υπό κρουστική τάση, είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι με εναλλασσόμενη τάση 50Hz επί 1min.
- Η διηλεκτρική αντοχή υπό συνεχή τάση, είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι με εναλλασσόμενη τάση.
- Η τάση διάσπασης κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις, είναι μεγαλύτερη κατά την αρνητική πολικότητα απ' ό,τι κατά τη θετική πολικότητα. Ο έλεγχος της διηλεκτρικής αντοχής των μονωτικών ελαίων γίνεται με ειδικές συσκευές. Τα ηλεκτρόδια, που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό, καθώς και η διαδικασία δοκιμής, καθορίζονται ανάλογα με τον κανονισμό που θα γίνουν οι δοκιμές. Γι' αυτό, όταν δίνονται τα αποτελέσματα ενός ελέγχου, είναι απαραίτητο να γίνεται αναφορά στον κανονισμό δοκιμών. Στα μονωτικά υγρά ανήκουν επίσης υδρογονάνθρακες, οι οποίοι έχουν υποστεί χλωρίωση, όπως: το Askarel, το rygranol και το Nerdin. Τα μονωτικά αυτά είναι άκαυστα και έχουν περίπου διπλάσια έως τριπλάσια διηλεκτρική σταθερά σε σχέση με το μονωτικό έλαιο, ωστόσο δεν χρησιμοποιούνται πλέον καθώς περιέχουν τοξικά συστατικά.

### 1.2.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Το **διηλεκτρικό** είναι μονωτής με χαρακτηριστική την ιδιότητα να πολώνει τα ηλεκτρικά φορτία του όταν τοποθετείται μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο. Τα διηλεκτρικά υλικά, σε σχέση με τους λοιπούς μονωτές, εμφανίζουν σε μεγάλο βαθμό το φαινόμενο αυτό της πόλωσης. Η ιδιότητά τους αυτή τους καθιστά χρήσιμους για την παραγωγή πυκνωτών, όπου το διηλεκτρικό τοποθετείται μεταξύ των οπλισμών του πυκνωτή και καθορίζει τη βασική ιδιότητα του πυκνωτή, τη χωρητικότητα, καθώς και το όριο της ηλεκτρικής τάσης υπό την οποία ο πυκνωτής μπορεί να λειτουργεί ομαλά (χωρίς δηλαδή να ξεσπούν σπινθήρες μεταξύ των οπλισμών του). Πιο συγκεκριμένα, η ειδική αγωγιμότητα όγκου ( $\sigma$ ) & ειδική επιφανειακή αγωγιμότητα ( $\sigma_e$ ) Τα δυο αυτά είδη αγωγιμότητας εμφανίζονται στα στερεά μονωτικά σώματα και ισχύει ότι  $\sigma \ll \sigma_e$ . Η ειδική επιφανειακή αγωγιμότητα ( $\sigma_e$ ) επηρεάζεται σημαντικά από την υγρασία του περιβάλλοντος και την επιφανειακή ρύπανση του σώματος. Είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία του ρεύματος ερπυσμού, ποσότητας σχετικά ασταθούς. Η κατανομή της πυκνότητας αυτού του ρεύματος δεν είναι ομοιόμορφη, διότι οι φορείς του ακολουθούν κατά προτίμηση ορισμένους αγωγίμους δρόμους διαρροής στην επιφάνεια ή ρωγμές του σώματος.

Απορρόφηση ενέργειας στα μονωτικά υλικά Όταν τα μονωτικά υλικά βρίσκονται υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου (Η.Π), απορροφούν έστω και λίγη ενέργεια από το πεδίο, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται ανεπιθύμητη απώλεια ενέργειας, η οποία μετατρέπεται κυρίως σε θερμότητα. Σε περίπτωση που η θερμότητα αυτή δεν αποβάλλεται με ταχύ ρυθμό προς το περιβάλλον, προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας των υλικών, με αποτέλεσμα αφενός την κακή λειτουργία και αφετέρου την εκδήλωση πιθανών βλαβών ή και τη πρόωρη καταστροφή των ηλεκτροτεχνικών διατάξεων που τα εμπεριέχουν. Πιο συγκεκριμένα, υπό συνεχή τάση, η απορρόφηση ενέργειας οφείλεται στη δημιουργία ρεύματος διαρροής στο μονωτικό σώμα, με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται θερμότητα λόγω του φαινομένου joule. Στα εναλλασσόμενα πεδία εμφανίζεται επιπλέον απορρόφηση ενέργειας και θέρμανση του σώματος, που προκαλείται από τις περιοδικές πολώσεις και αποπολώσεις του, σύμφωνα με τους διάφορους μηχανισμούς πόλωσης. Η απώλεια ενέργειας, ανά περίοδο και ανά μονάδα όγκου, είναι :

$$W = \pi \cdot EEmm^2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \tan\delta$$

Όπου  $EEmm$  : μέγιστη τιμή πεδιακής έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.  $\tan\delta$  : εφαπτομένη απωλειών ή συντελεστής απορρόφησης.

Η εφαπτομένη απωλειών εκφράζει τη συμπεριφορά του υλικού για δεδομένες συνθήκες συχνότητας πεδίου, θερμοκρασίας κ.α. Η γωνία  $\delta$  δείχνει το χρονικό προβάδισμα με το οποίο το διηλεκτρικό παρακολουθεί τη μεταβολή του πεδίου σε ένα πυκνωτή, σε σύγκριση με τη λειτουργία του πυκνωτή, εάν είχε διηλεκτρικό το κενό.

Επιθυμητές ιδιότητες μονωτικών υλικών Για εφαρμογές σε συνεχές πεδίο έχει σημασία η τιμή των μεγεθών  $\sigma$  και  $\epsilon_r$  να είναι χαμηλή, ενώ στο εναλλασσόμενο πεδίο αναζητούνται υλικά με μικρό  $\epsilon_r$  και  $\tan\delta$ , στις συχνότητες λειτουργίας που ενδιαφέρουν άμεσα. Να σημειωθεί ότι, τα μεγέθη  $\epsilon_r$  και  $\tan\delta$  μεταβάλλονται σημαντικά με τη συχνότητα. Η διηλεκτρική αντοχή είναι ίση με τη μέγιστη ένταση ( $E_{δ.,max}$ ), η οποία μπορεί να εφαρμοστεί στο υλικό χωρίς αυτό να χάσει τις μονωτικές του ιδιότητες. Το μέγεθος έχει ιδιαίτερη βαρύτητα στην επιλογή υλικών για εφαρμογές σε διατάξεις υψηλών τάσεων. Σημαντικό κριτήριο για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών στις διάφορες εφαρμογές αποτελεί φυσικά το κόστος. Άλλες ιδιότητες των μονωτικών υλικών, που αποκτούν μεγάλη σημασία σε ειδικότερες περιπτώσεις, είναι: η θερμική αγωγιμότητα, η μηχανική αντοχή, η χημική σταθερότητα, η υγροσκοπικότητα, η αντοχή στις ακτινοβολίες, η πυκνότητα, το ιξώδες στα υγρά μονωτικά, η θερμική αντοχή και η ανθεκτικότητα στις βιολογικές επιδράσεις από έντομα και μικροοργανισμούς. Πολλές από τις ανωτέρω ιδιότητες των μονωτικών υλικών δεν έχουν σταθερές τιμές, αλλά επηρεάζονται και από άλλους παράγοντες όπως: η συχνότητα του πεδίου, η θερμοκρασία, ο χρόνος και η υγρασία του σώματος. Συγκεκριμένα, η υγρασία υποβαθμίζει τις ιδιότητες των μονωτικών υλικών γι' αυτό στοχεύουμε στην υγροσκοπικότητα, που είναι η τάση των υλικών να απορροφούν υγρασία από το περιβάλλον. Επιπλέον, η θερμική αγωγιμότητα ορίζεται ως η δυνατότητα απαγωγής της θερμότητας, που παράγεται στο υλικό, λόγω ηλεκτρικών απωλειών. Για τα περισσότερα μονωτικά υλικά, η ειδική θερμική αγωγιμότητα είναι σχεδόν σταθερή για θερμοκρασίες μεταξύ 20 – 100°C. Ανάλογα με τη χρήση του μονωτικού υλικού, δίνουμε μεγαλύτερη σημασία στη μια ή στην άλλη ιδιότητα του. Στις ηλεκτρικές μονώσεις υψηλών

τάσεων σημαντικότερη είναι η μεγάλη διηλεκτρική αντοχή για την αποφυγή ηλεκτρικής διάσπασης. Στην παράγραφο που ακολουθεί, θα επικεντρωθούμε στα διηλεκτρικά ελαία, στις ιδιότητες που μας ενδιαφέρουν ιδιαίτερα σε αυτά και στις κατηγορίες που χρησιμοποιούνται στους μετασχηματιστές ισχύος.

### 1.2.2 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

**1) Διηλεκτρική αντοχή:** Σαν διηλεκτρική αντοχή μπορεί να οριστεί η μέγιστη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που μπορεί να εφαρμοστεί ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια που είναι βυθισμένα μέσα στο λάδι χωρίς να δημιουργηθεί τόξο. Η τάση διάσπασης είναι η μέση τιμή της τάσης στην οποία επιτυγχάνεται διάσπαση του λαδιού που βρίσκεται μεταξύ των ηλεκτροδίων, υπό προδιαγραφόμενες συνθήκες. Η τάση διάσπασης εκφράζεται σε KV για ορισμένο διάκενο. Όταν τα μονωτικά λάδια έχουν μεγάλη διηλεκτρική αντοχή εξασφαλίζεται καλύτερη μόνωση των υπό τάση στοιχείων που βρίσκονται μέσα σε αυτά, η δε χρήση λαδιών μεγάλης διηλεκτρικής αντοχής επηρεάζει κατά κάποιον τρόπο τις διαστάσεις των μηχανημάτων στα οποία χρησιμοποιούνται τέτοια λάδια. Βέβαια η διηλεκτρική αντοχή δεν αποτελεί απόλυτο κριτήριο, ικανό για την εκτίμηση της ποιότητας του λαδιού. Πολύ γερασμένα λάδια μπορεί να έχουν μεγάλη διηλεκτρική αντοχή. Μπορούμε να πούμε ότι στην πράξη δεν εξαρτάται από τη σύνθεση του λαδιού αλλά μόνο από τα περιεχόμενα σε αυτό όπως νερό, ίνες και αέρια δηλαδή μόνο από την καθαρότητα του. Σε ομογενές πεδίο η διηλεκτρική αντοχή ( $E_d$ ) προσδιορίζεται από τη σχέση:  $E_d = U_{dmin} / d$  όπου  $U_{dmin}$  η ελάχιστη ενεργός τιμή της τάσης για τη διάσπαση και  $d$  η απόσταση των ηλεκτροδίων.

**2) Ειδική αντίσταση (αγωγιμότητα):** Ορίζεται ως η ωμική αντίσταση που παρουσιάζει μια μονάδα όγκου ενός υλικού. Η ειδική αντίσταση του λαδιού μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του. Έτσι η μέτρηση του μεγέθους αυτού πρέπει να είναι  $5 \cdot 10^{11} \div 5 \cdot 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ .

**3) Διηλεκτρική σταθερά:** Η διηλεκτρική σταθερά είναι ένα αδιάστατο μέγεθος το οποίο εκφράζει το πόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα μίας διάταξης συγκριτικά με εκείνη στο κενό. Η διηλεκτρική σταθερά είναι  $2,2 \div 2,4$  στους  $20^\circ\text{C}$ . Οι διηλεκτρικές σταθερές των διαφόρων μονωτικών υλικών που συνθέτουν μία μόνωση π.χ. περιελίξεις μετασχηματιστών, μονώσεις καλωδίων θα πρέπει να επιλέγονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εξομαλύνεται η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων. Αυτός είναι και ο λόγος που ο συνδυασμός του μονωτικού χαρτιού και του ελαίου βρίσκει πολλές πρακτικές εφαρμογές. Τα δύο μονωτικά υλικά έχουν την ίδια περίπου διηλεκτρική σταθερά με αποτέλεσμα να μην συμβαίνει διάθλαση των πεδιάδων γραμμών στη διαχωριστική επιφάνειά τους. Επιπλέον το έλαιο εμποτίζει το χαρτί, ώστε να αποκλείεται η ύπαρξη αέρα, ο οποίος θα δημιουργούσε προβλήματα λόγω της μικρής διηλεκτρικής αντοχής του.

**4) Συντελεστής απωλειών:** Όταν τα μονωτικά υλικά βρίσκονται κάτω από την επίδραση ηλεκτρικών πεδίων, αναπτύσσονται διάφοροι μηχανισμοί οι οποίοι απορροφούν ενέργεια από τα πεδία, δηλαδή έχουμε απώλεια ενέργειας. Η ενέργεια που απορροφάται στα υλικά μετατρέπεται κυρίως σε θερμότητα, η οποία αν δεν αποβληθεί προς το περιβάλλον, προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας των υλικών με αποτέλεσμα την κακή λειτουργία, τις βλάβες και την πρόωρη καταστροφή των διατάξεων. Κάτω από συνεχή τάση η απορρόφηση

της ενέργειας οφείλεται στην δημιουργία του ρεύματος διαρροής στο μονωτικό σώμα, εξαιτίας της αγωγιμότητας όγκου ή και της επιφανειακής αγωγιμότητας. Δηλαδή η θέρμανση του υλικού οφείλεται στο φαινόμενο Joule. Στα εναλλασσόμενα πεδία εμφανίζεται μία επιπλέον απορρόφηση από τις περιοδικές πολώσεις και αποπολώσεις του, σύμφωνα με τους διάφορους μηχανισμούς πόλωσης.

### **1.3 ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑ-ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ**

Αποτελούνται από αρκετές δεκάδες ή ακόμα και εκατοντάδες μόρια ή και άτομα και παρέχουν τεράστια ποικιλία στο σχήμα και στη μορφολογία του. Στο εμπόριο μπορούν να βρεθούν με τη μορφή σκόνης ή υγρών αιωρημάτων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή περιβλημάτων, συσκευών ή συστατικών που μπορούν να διατηρήσουν τη δομή των νανοϋλικών από τα οποία προέρχονται. Σημαντική ιδιότητα είναι ότι το κλάσμα της επιφάνειας προς τη μάζα είναι πολύ μεγαλύτερο από διάφορα άλλα σωματίδια. Λόγω της παραπάνω ιδιότητας οι αντιδράσεις αυτών εκτελούνται με γρήγορους αρκετά ρυθμούς. Επίσης, μπορούν να μεταφέρουν και να απορροφούν διάφορα σύνθετα υλικά εξαιτίας της μεγάλης επιφάνειας που διαθέτουν. Επιπρόσθετα, αυξάνεται πολύ ο αριθμός των αλληλεπιδράσεων και έτσι τα υλικά αυτά έχουν αυξημένη αντοχή και χημική και θερμική αντίσταση.

#### **1.3.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ**

Τα νανοσωματίδια παρασκευάζονται με 2 βασικές μεθόδους. Η πρώτη είναι η Bottom up approach δηλαδή η από κάτω προς τα πάνω προσέγγιση και η top down approach που είναι η από πάνω προς τα κάτω προσέγγιση. Στη πρώτη ένα νανοϋλικό συντίθεται από αντιδράσεις σε μοριακό ή ατομικό επίπεδο στην ύλη και έτσι αυξάνεται σιγά σιγά το μέγεθος. Στη δεύτερη προσέγγιση ένα υλικό με μεγάλες διαστάσεις χωρίζεται σε μια μικρή κλίμακα.

##### Top-down προσέγγιση

Η top-down προσέγγιση αντικατοπτρίζεται σε νανοσωματίδια για να δημιουργηθούν οι νανοδομές και οι λειτουργικές συσκευές σε επιθυμητά χαρακτηριστικά και σχήματα, αφού έχουμε ξεκινήσει από μεγάλες διαστάσεις και μειώνουμε μέχρι την επιθυμητή. Η προσέγγιση αυτή χωρίζεται στην ξηρή και υγρή λείανση. Το χαρακτηριστικό των σωματιδίων στις διεργασίες κόκκων είναι η αύξηση της ενέργειας τους στην επιφάνεια η οποία συμβάλει στην αύξηση συσσωμάτων των σωματιδίων. Στη ξηρά λείανση έχουμε στερεά ουσία η οποία αλέθεται και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τις δονήσεις συμπίεσης ή τριβής. Γνωρίζουμε, ότι η συμπύκνωση των μικρών σωματιδίων γίνεται τυχαία με την κονιορτοποίηση οπότε είναι δύσκολο να βρεθούν σωματίδια από 3μm και πάνω με την εκλέπτυνση κόκκων. Από την άλλη μεριά για την υγρή λείανση σε ένα στερεό σωματίδιο επιτυγχάνεται με διάφορους μεθόδους. Σε σχέση με την ξηρή, η υγρή είναι κατάλληλη για συμπύκνωση σε νανοσωματίδια που σχηματίζονται με τρόπο που περιλαμβάνονται αρκετά

διασπαρμένα νανοσωματίδια. Επίσης, περιλαμβάνεται άκαμπτη πλαστική παραμόρφωση και μέθοδος μηχανικής κραματοποίησης.

### Bottom-up προσέγγιση

Η προσέγγιση bottom-up έχει ατομικά ή μοριακά συστατικά που διαμορφώνουν περίπλοκα νανοδομές με βάση εξελιγμένους μηχανισμούς και τεχνολογίες. Ουσιαστικά χρησιμοποιείται σε μικρά μόρια ή άτομα για δομικές μονάδες πολυεπίπεδων δομών που εκτελούν αρκετές λειτουργίες. Οι κατηγορίες αυτής της προσέγγισης αποτελούν τεχνικές από αέρια και υγρή φάση.

### Ιδιότητες νανοσωματιδίων

1. Η έκταση της επιφάνειας έχει δείξει πως πολλές ιδιότητες διαφέρουν σχετικά με το μέγεθος του σωματιδίου. Για σωματίδια με μέγεθος πιο μικρό από ένα μικρόμετρο οι δυνάμεις που προκύπτουν το ατομικό ή μοριακό επίπεδο υπερισχύουν κατά πολύ από τη βαρύτητα. Το κλάσμα της επιφάνειας προς τη μάζα είναι πού μεγαλύτερος από διάφορα υλικά ή σωματίδια και για αυτό οι αντιδράσεις των νανοσωματιδίων πραγματοποιούνται πολύ γρήγορα. Επίσης, εξαιτίας της επιφάνειας που είναι μεγάλη τα νανοσωματίδια μπορούν να μεταφέρουν και να απορροφούν διάφορα σύνθετα υλικά. Η μεγάλη επιφάνεια μπορεί να αυξήσει τις αλληλεπιδράσεις στα νανοςύνθετα υλικά που αποτελούνται κυρίως από νανοσωματίδια. Τέλος, τα υλικά έχουν αυξημένη αντοχή και χημική και θερμική αντίσταση.

2. Οι οπτικές ιδιότητες που έχουν τα νανοσωματίδια είναι καθορισμένες αφού το πάχος στρώματος των ηλεκτρονίων των μετάλλων είναι μεγάλο σε σχέση με τα νανοσωματίδια και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παρατηρούνται κβαντικά φαινόμενα. Τα νανοσωματίδια δεν έχουν απαραίτητα το ίδιο χρώμα με τα υλικά αφού για παράδειγμα ενώ ο χρυσός είναι κίτρινος, τα νανοσωματίδια χρυσού είναι κόκκινα προς μαύρα. Ακόμα τήκονται σε χαμηλή θερμοκρασία ενώ οι πλάκες χρυσού τήκονται σε πολύ μεγαλύτερη.

3. Η ομοιομορφία δηλαδή τα συσσωματώματα ή οι συστάδες που είναι ατομικοί ή μοριακοί συνδυασμοί σχηματίζουν νανοσωματίδια που καθορίζονται από την αλληλεπίδραση των δυνάμεων μεταξύ των μορίων ή των ατόμων ενός σωματιδίου και από τις δυνάμεις αλληλεπίδρασης μεταξύ των σωματιδίων.

4. Η τροποποίηση μια διαδικασία στην οποία τα νανοσωματίδια καταφέρνουν να συνδεθούν με διάφορους μικροβιολογικούς παράγοντες μέσα από φυσικές διεργασίες που γίνονται στο νερό ή την ατμόσφαιρα ή στην επιφάνεια της γης.

5. Ο κβαντικός περιορισμός, δηλαδή, είναι οι αλλαγές που γίνονται στις ιδιότητες που αποτελούν εξάρτηση από το μέγεθος που περιλαμβάνουν τον κβαντικό περιορισμό. Αυτό το φαινόμενο προκαλεί ιδιότητες ημιαγωγιμότητας για σωματίδια που βρίσκονται κοντά με διάμετρο μικρότερη από 10nm.

### **1.3.2ΔΙΑΜΟΡΙΑΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΤΩΝ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ**

Μετά το σχηματισμό τους τα νανοσωματίδια έχουν τη δυνατότητα να αλληλοεπιδράσουν με άλλα γειτονικά σωματίδια ή μόρια με αποτέλεσμα το σχηματισμό συσσωματωμάτων. Αν

και αυτές οι διαμοριακές δυνάμεις είναι ασθενέστερες από τις δυνάμεις που είναι υπεύθυνες για το σχηματισμό των δεσμών μεταξύ των ατόμων, εντούτοις η αύξηση των διαμοριακών αυτών δυνάμεων περιλαμβάνει ένα σημαντικό ποσό ενέργειας, γεγονός που εξηγεί την προσκόλληση των σωματιδίων σε διάφορες επιφάνειες ή την ένωση των νανοσωματιδίων μεταξύ τους ύστερα από μία κρούση. Υπάρχουν δύο κατηγορίες διαμοριακών δυνάμεων που αναπτύσσονται μεταξύ των νανοσωματιδίων ή άλλων μορίων. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις μη εξειδικευμένες ακόρεστες διαμοριακές δυνάμεις και απαρτίζεται από τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις, τις δυνάμεις Van der Waals, τις υδροφοβικές αλληλεπιδράσεις και τις αλληλεπιδράσεις στοίβας (stacking interactions). Η επόμενη κατηγορία περιλαμβάνει τις εξειδικευμένες κορεσμένες διαμοριακές δυνάμεις. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν οι δεσμοί υδρογόνου και οι δεσμοί μεταφοράς φορτίου (charge transfer bond). Οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις οι οποίες αναπτύσσονται μεταξύ των φορτισμένων επιφανειών δύο νανοσωματιδίων μπορεί να είναι είτε ελκτικές είτε απωστικές. Απωστικές δυνάμεις αναπτύσσονται όταν τα φορτία των επιφανειών των νανοσωματιδίων είναι όμοια με αποτέλεσμα το διαχωρισμό των νανοσωματιδίων και την αποφυγή δημιουργίας συσσωματωμάτων. Ελκτικές δυνάμεις ασκούνται σε νανοσωματίδια με αντίθετα φορτία γεγονός που επιταχύνει τη δημιουργία συσσωματωμάτων. Το μέγεθος των ηλεκτροστατικών αυτών δυνάμεων είναι αντιστρόφως ανάλογο με το τετράγωνο της μεταξύ τους απόστασης, σύμφωνα με το γνωστό νόμο του Coulomb . Οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις είναι πιο ισχυρές στον αέρα απ' ό τι στο νερό, αφού το νερό εμφανίζει υψηλότερη διηλεκτρική σταθερά με αποτέλεσμα να μειώνεται η πιθανότητα τα φορτισμένα νανοσωματίδια να πλησιάσουν μεταξύ τους. Ένα φορτισμένο νανοσωματίδιο παράγει στον περιβάλλοντα χώρο του ένα πεδίο, το οποίο πολώνει τα γύρω μόρια, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ελκτικές δυνάμεις μεταξύ του σωματιδίου και των μορίων, οι οποίες τελικά καταλήγουν στη δημιουργία ενός συσσωματώματος. Τα μόρια μπορεί να διαθέτουν μία μόνιμη διπολική ροπή, η οποία προκαλεί το σχηματισμό σταθερότερων συσσωματωμάτων μεγαλύτερης μάζας. Οι δυνάμεις Van der Waals συνδέονται με την ύπαρξη διπόλων, τα οποία μπορεί να είναι είτε μόνιμα ή επαγόμενα και στιγμιαία σε ένα νανοσωματίδιο. Η ένταση των δυνάμεων αυτών είναι αντιστρόφως ανάλογη με την έκτη δύναμη της απόστασης μεταξύ δύο νανοσωματιδίων, γεγονός που πρακτικά σημαίνει πως η ένταση των δυνάμεων αυτών μειώνεται πολύ γρήγορα, καθώς αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των δύο νανοσωματιδίων. Εξαιτίας της εμφάνισης των δυνάμεων Van der Waals παρατηρούνται πιο συχνά ελκτικές αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στα νανοσωματίδια και όχι απωστικές . Οι υδροφοβικές αλληλεπιδράσεις λαμβάνουν χώρα στην περίπτωση που τα υδροφοβικά μόρια ενός υλικού τοποθετηθούν μέσα σε νερό. Σε αυτήν την περίπτωση τα μόρια του νερού περικυκλώνουν το υδροφοβικό μόριο με αποτέλεσμα να δημιουργείται μία σχεδόν κρυσταλλική επιφάνεια. Αυτό συμβαίνει για να μεγιστοποιηθεί η ενδομοριακή γέφυρα υδρογόνου των μορίων του νερού γύρω από την υδροφοβική επιφάνεια. Εάν δύο υδροφοβικά κύτταρα συναντηθούν, οι υδροφοβικές τους επιφάνειες θα συνδεθούν η μία με την άλλη και τα μόρια του νερού τα οποία ήταν προσκολλημένα στις δύο αυτές επιφάνειες κατανέμονται στην επιφάνεια του μεγαλύτερου διαλύτη. Οι αλληλεπιδράσεις στοίβας (stacking interactions) συμβαίνουν μεταξύ επιπέδων αρωματικών ή ετεροαρωματικών συστημάτων. Οι πιο συνηθισμένες αλληλεπιδράσεις στοίβας λαμβάνουν χώρα στο DNA. Σε αυτήν την περίπτωση, οι δυνάμεις αυτές συμβάλλουν στη σταθερότητα της διπλής έλικας. Ο δεσμός υδρογόνου ανήκει στις εξειδικευμένες κορεσμένες

διαμοριακές δυνάμεις και αναπτύσσεται όταν το ηλεκτραρνητικό άτομο ενός μορίου, το οποίο συνδέεται με ένα μόριο υδρογόνου, αλληλοεπιδρά με ένα διαφορετικό ηλεκτραρνητικό άτομο. Στην περίπτωση των νανοσωματιδίων, για να αναπτυχθεί ένας δεσμός υδρογόνου, το νανοσωματίδιο θα πρέπει να διαθέτει μία επιφάνεια η οποία απαρτίζεται από ομάδες μορίων οξυγόνου (O) – υδρογόνου (H) ή αζώτου (N) – υδρογόνου (H). Ένας δεσμός μεταφοράς φορτίου μπορεί να αναπτυχθεί κατά την αλληλεπίδραση δύο νανοσωματιδίων, όπου ένα ηλεκτρόνιο-δότης από το πρώτο νανοσωματίδιο μπορεί να αλληλοεπιδράσει με ένα ηλεκτρόνιο-δέκτη από το άλλο νανοσωματίδιο. Οι δεσμοί μεταφοράς φορτίου δεν είναι σταθεροί χημικοί δεσμοί, συνεπώς οι δυνάμεις που αναπτύσσονται είναι ασθενέστερες από αυτές των ομοιοπολικών δυνάμεων.

### 1.3.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΝΑΝΟΕΛΑΙΩΝ

Τα πλεονεκτήματα των νανοελαίων μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- I. Τα νανοέλαια παρουσιάζουν αυξημένη τάση διάσπασης τόσο υπό εναλλασσόμενη, όσο και υπό κρουστική τάση.
- II. Η AC τάση διάσπασης των νανοελαίων επηρεάζεται λιγότερο από τη υγρασία σε σχέση με τα κοινά λαδιά.
- III. Τα νανοέλαια παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή στο φαινόμενο της γήρανσης και μπορούν να αυξήσουν την αξιοπιστία και τη διάρκεια ζωής των μετασχηματιστών ισχύος.
- IV. Τα νανοέλαια έχουν υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα συνεισφέροντας αποδοτικότερα στη ψύξη των μετασχηματιστών.
- V. Τα νανοέλαια παρουσιάζουν βελτιωμένη I-V χαρακτηριστική μερικής εκκένωσης.

### 1.3.4 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Είδαμε ότι η χρήση νανοελαίων μας παρέχει αυξημένη τάση διάσπασης, ανθεκτικότητα στο φαινόμενο της γήρανσης και καλύτερα χαρακτηριστικά μερικών εκκενώσεων, ωστόσο υπάρχουν ακόμα ορισμένοι παράμετροι που περιορίζουν την χρήση τους στη βιομηχανία και το εμπόριο. Η εισαγωγή νανοϋγρών για βιομηχανική χρήση απαιτεί αυτά να συνδέονται με μακροχρόνια σταθερότητα, χαμηλό ή προσιτό κόστος και κατανόηση των πιθανών επιπτώσεων των νανοϋλικών στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Παρακάτω αναπτύσσονται συνοπτικά οι υπάρχουσες ανησυχίες γύρω από τη χρήση νανοελαίων.

- Η σταθερότητα του νανοϋγρού. Ένα νανοϋγρό είναι θεωρητικά σταθερό, αν τα σωματίδια στο εσωτερικό του είναι μικρότερα των 100nm . Ωστόσο, είναι δύσκολο να κρατηθούμε κάτω από αυτό το μέγεθος λόγω των ισχυρών ελκτικών δυνάμεων, που αναπτύσσονται μεταξύ των νανοσωματιδίων και μπορεί να οδηγήσουν σε συσσωματώματα. Τα συσσωματώματα αυτά που προκύπτουν έχουν υψηλότερη πυκνότητα σε σχέση με το μητρικό λαδί με αποτέλεσμα να κατακάθονται ως ίζημα.

- Κίνδυνοι για την ανθρώπινη υγεία. Τα νανοσωματίδια έχουν αναγνωριστεί ως ένας μεγάλος κίνδυνος για την υγεία και την ασφάλεια στην εργασία (OHS) και εκφράζονται σοβαρές ανησυχίες γύρω από τη χρήση τους. Η βλαπτικότητα των νανοϋλικών εξακολουθεί να είναι διφορούμενη. Τα νανοσωματίδια είναι πιο επικίνδυνα σε σύγκριση με τα μικρού

μεγέθους σωματίδια ή τα υλικά σε μορφή σκόνης λόγω της υψηλής αντιδραστικότητας της επιφάνειάς τους. Η επαφή των νανοσωματιδίων γίνεται ιδιαίτερα επικίνδυνη για τον άνθρωπο σε περίπτωση εισπνοής και εισόδου τους με αυτόν το τρόπο στο ανθρώπινο σώμα. Ακόμα και η έκθεση σε μικρή ποσότητα νανοσωματιδίων μπορεί να προκαλέσει σοβαρή απειλή για την υγεία. Για παράδειγμα, το οξείδιο του σιδήρου θεωρείται επιβλαβές για τους πνεύμονες του ανθρώπου. Η έκθεση σε νανοσωματίδια χαλκού, χρωμίου και ψευδαργύρου μπορεί να προκαλέσει πνευμονικές δυσλειτουργίες ακόμη και καρκίνο. Υπάρχει επίσης υψηλός κίνδυνος ορισμένα νανοσωματίδια να μεταφερθούν από την αναπνευστική οδό σε άλλα όργανα, συμπεριλαμβανομένου του κεντρικού νευρικού συστήματος. Οι μελέτες δείχνουν ότι τα νανοσωματίδια ZnO υψηλής συγκέντρωσης είναι ιδιαίτερα τοξικά, τα νανοσωματίδια αλουμινίου είναι μέτρια τοξικά και τα νανοσωματίδια μαγνητίτη είναι ελαφρώς τοξικά. Τα νανοσωματίδια τιτανίου είναι θανατηφόρα και μπορούν να ταξιδεύουν στον ανθρώπινο εγκέφαλο από τους οσμηρούς νευρώνες κατά την εισπνοή. Τα νανοσωματίδια έχουν επίσης τη δυνατότητα να διεισδύσουν μέσω του δέρματος με τη πιθανότητα ωστόσο να παραμένει χαμηλή λόγω του πάχους του. Παράλληλα, αν διεισδύσουν μέσω του πεπτικού συστήματος, μπορεί να εισέλθουν στη κυκλοφορία του αίματος και να συσσωρευτούν στο συκώτι. Πρέπει λοιπόν να λαμβάνονται οι απαραίτητες προφυλάξεις για τον εργαζόμενο κατά τη προετοιμασία των νανοϋγρών προκειμένου να αποφευχθούν οι προαναφερθέντες κίνδυνοι.

- Περιβαλλοντικά ζητήματα. Η νανοτεχνολογία αποτελεί εξίσου σοβαρό παράγοντα για περιβαλλοντικά ζητήματα, καθώς τα νανοσωματίδια και τα υποπροϊόντα τους μπορούν να απελευθερωθούν στην περιβάλλουσα ατμόσφαιρα και το νερό κατά τη διάρκεια της παραγωγής, της μεταφοράς και της προετοιμασίας τους. Σε τέτοιες περιπτώσεις αυτά τα νανοσωματίδια συσσωρεύονται στο νερό, το έδαφος και τα φυτά. Η επίδραση των νανοσωματιδίων στους ανθρώπους και το περιβάλλον διαφέρουν κατά τα διάφορα στάδια του κύκλου ζωής τους. Οι επιπτώσεις πρέπει να εξεταστούν και να υπάρξει περαιτέρω μελλοντική έρευνα. Η πιθανή απειλή στο περιβάλλον από τα νανοσωματίδια μπορεί να μειωθεί με τη χρήση απότελεσματικού τρόπου παραγωγής, μεταφοράς και προετοιμασίας.

- Υψηλό κόστος των νανοϋγρών. Το υψηλότερο κόστος κατασκευής των νανοϋγρών είναι επίσης ένας από τους λόγους που μπορούν να αποτρέψουν τη χρήση τους σε εμπορικό και βιομηχανικό επίπεδο. Και οι δύο μέθοδοι, ενός βήματος και δύο βημάτων χρησιμοποιούν ακριβή, προηγμένη διαδικασία για την προετοιμασία των νανοϋγρών γεγονός που τα καθιστά ακριβή εναλλακτική λύση.



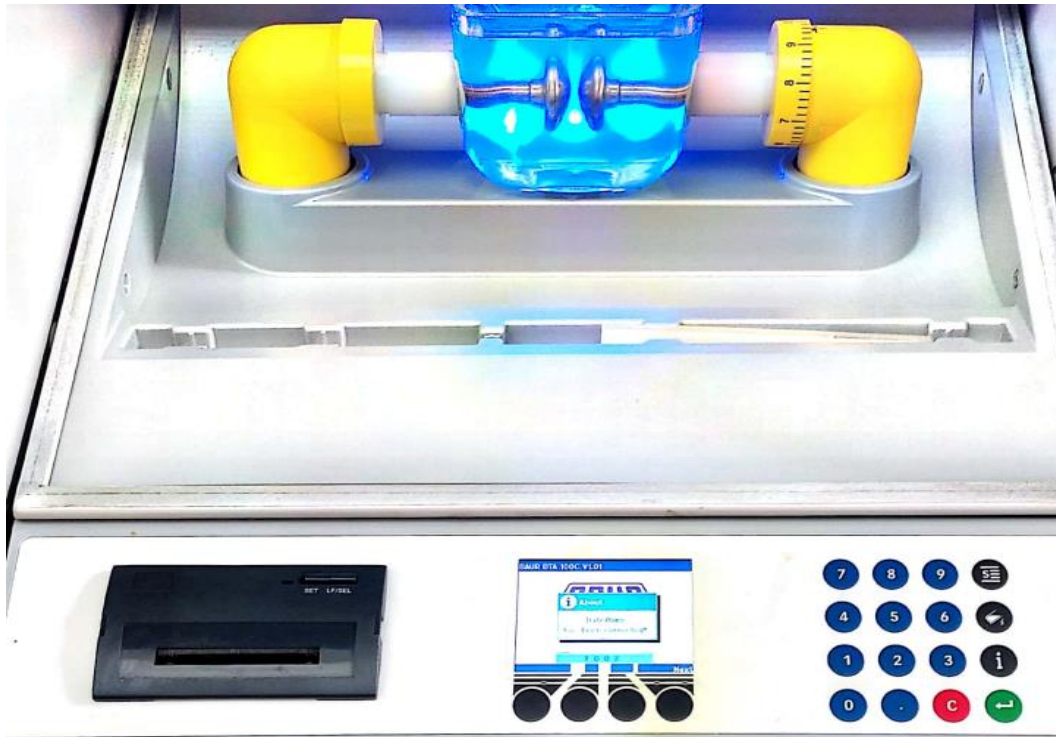
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

### 2.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει αναλυτική περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε καθώς επίσης και η παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Θα συνεχίσουμε με τη στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων του πειράματος (κεφάλαιο 2) και τέλος, θα καταλήξουμε στα συμπεράσματα (κεφάλαιο 3)

#### 2.1.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ AC ΤΑΣΗΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΦΥΤΙΚΟΥ ΕΛΑΙΟΥ .

Στις 4/10/2021 βρεθήκαμε στο εργαστήριο για τις μετρήσεις του φυτικού εστέρα FR3. Αρχικά , καταγράψαμε τις ενδείξεις της θερμοκρασίας στους 25.4°C, της πίεσης στα 775mmHg και της υγρασίας σε ποσοστό 34.4% εντός της αίθουσας του εργαστηρίου υψηλών τάσεων . Στη συνέχεια , βεβαιωθήκαμε ότι τα σκεύη που θα χρησιμοποιηθούν για τις μετρήσεις έχουν πλυθεί και έχουν καθαριστεί κατάλληλα πριν την έναρξη των μετρήσεων . Πιο αναλυτικά, τοποθετήσαμε το φυτικό έλαιο στο φούρνο (Eικ1)για 24 ώρες στους 100°C για να απορροφηθεί μεγάλο κομμάτι της υγρασίας η οποία είναι παράμετρος στο πείραμα . Στη συνέχεια , τοποθετείτε το έλαιο μέσα στη Κυψέλη με τα δύο μεταλλικά ημισφαιρικά ηλεκτρόδια τύπου Rogowski 2.5 χιλιοστών απόσταση το ένα από το άλλο . Ύστερα η κυψέλη με το έλαιο θα εισέλθει στη γεννήτρια παραγωγής AC τάσης BAUR DTA 100 C. Θα ρυθμιστεί στο πρότυπο IEC 60156 με ονομαστική τάση μηχανήματος στα 100kV και συχνότητα διάσπασης τα 2kV/sec .Κάπως έτσι γίνεται το πρώτο βήμα εκκαθάρισης των ρύπων του ελαίου , χρειάζονται 5min έτσι ώστε να απομακρυνθούν οι φυσαλίδες. Εφόσον ολοκληρωθούν τα πρώτα πέντε λεπτά , γίνεται η πρώτη διάσπαση και ξεκινούν τα δέκα δεκάλεπτα σετ μετρήσεων του μονωτικού νανοελαίου. Να σημειωθεί ότι μεταξύ της κάθε μέτρησης μεσολαβούν δύο λεπτά για να απομακρυνθούν οι φυσαλίδες ενώ μεταξύ των σετ 5 λεπτά για να απομακρυνθούν απ' τα ηλεκτρόδια .Αντιλαμβανόμαστε ότι όλη αυτή η διαδικασία οφείλεται στις πιθανότητες, οι τιμές είναι τυχαίες γιατί το υγρό δηλαδή το έλαιο είναι μέσα στο δοχείο και υπάρχει πλήθος σωματιδίων ολόγυρα για αυτό υπάρχει και πλήθος μετρήσεων για να προσεγγιστεί με το καλύτερο δυνατόν τρόπο η διάσπαση . Γνωρίζουμε επίσης ότι όσο πιο καθαρός είναι ο χώρος που βρίσκεται το έλαιο φυτικού εστέρα FR3 τόσο περισσότερες θα είναι φυσαλίδες με αποτέλεσμα να παρατηρούμε και υψηλή τάση η οποία όταν οι φυσαλίδες και τα σωματίδια μετακινηθούν αυτή αλλάζει με τυχαίο ρυθμό. Κλείνοντας, ο ήχος που ακούγεται κάθε φορά λίγο πριν επέλθει διάσπαση οφείλεται απ' το μηχάνημα, είναι ένας διακόπτης ο οποίος τίθεται σε λειτουργία όταν παρατηρείται αύξηση των 25 mA. Αυτό ακριβώς συμβαίνει για να προστατευτεί το ίδιο το μηχάνημα αλλά και για να υπάρχει αξιοπιστία στις μετρήσεις αλλά και ο διακόπτης υπάρχει και για να μην υποβαθμιστεί η αντοχή του ελαίου, για να μπορέσουμε να έχουμε επαναληψιμότητα στο πείραμα .



Εικ1: Γεννήτρια παραγωγής AC τάσης BAUR DTA 100 C



Εικ2: Γεννήτρια παραγωγής AC τάσης BAUR DTA 100 C

## 2.2: ΚΡΟΥΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ

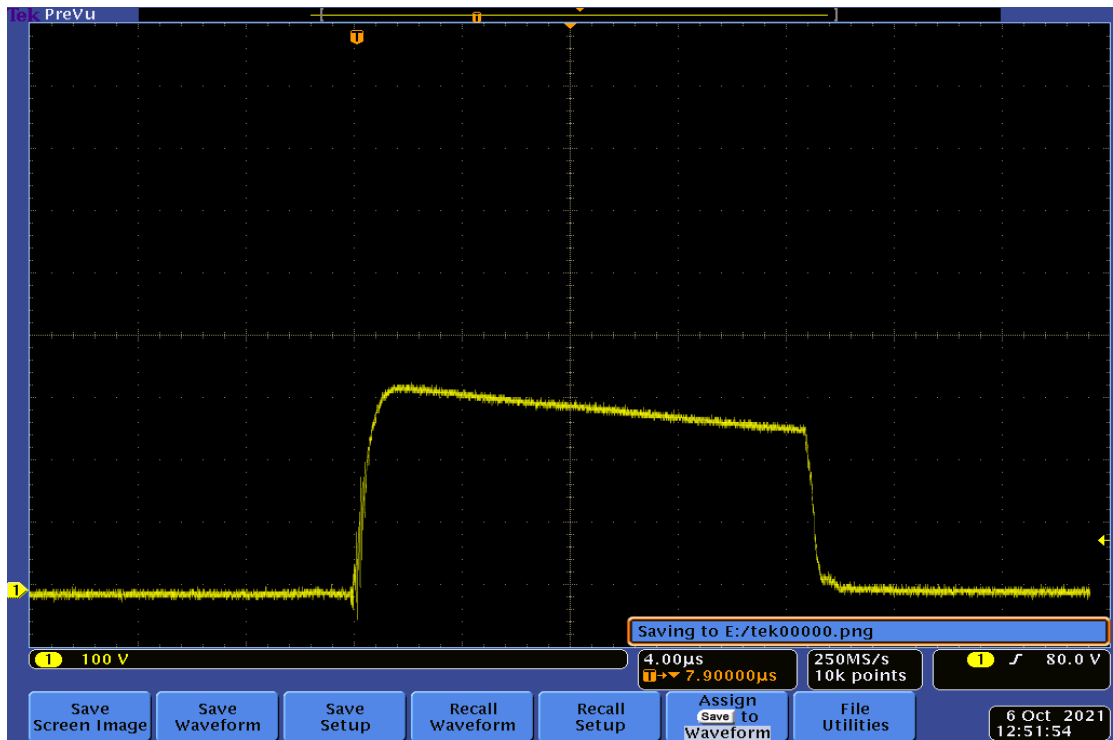
Στις 6/10/2021 στο εργαστήριο υψηλών τάσεων έλαβαν χώρα οι μετρήσεις για τη δοκιμή της κρουστικής τάσης υπό θετική πολικότητα για το φυτικό έλαιο εστέρα FR3. Αρχικά , έγινε καταγραφή των ατμοσφαιρικών συνθηκών στο χώρο με τη πίεση να αγγίζει τα 755mmHg, τη θερμοκρασία τους 25.1°C και την υγρασία σε ποσοστό 39.6%. Το φυτικό έλαιο όπως και στη διαδικασία της εναλλασσόμενης τάσης προτού τεθεί υπό δοκιμές απαλλάχθηκε σε μεγάλο ποσοστό απ' το παράγοντα της υγρασίας με τη βοήθεια του φούρνου ,γενικά , δεν υπήρχε οποιαδήποτε μορφή ρύπων . Πριν ξεκινήσει η πειραματική διαδικασία τα σκεύη δηλαδή η κυψέλη , το σφαιρίδιο , η ακίδα καθαρίστηκαν σχολαστικά. Συγκεκριμένα, για τα σκεύη η σφαίρα έχει διάμετρο 12,7 mm ενώ το πρότυπο της ακίδας είναι στα 50 μm για την ακτίνα καμπυλότητα της , όσο αφορά το διάκενο μεταξύ τους ρυθμίστηκε με μια μεταλλική πλάκα στα 2.5 cm. Ύστερα τέθηκε σε εφαρμογή η πειραματική διαδικασία στην οποία έχουν γίνει οι κατάλληλες συνδέσεις στη διάταξη με τη γεννήτρια και το παλμογράφο και έχουν παρθεί τα απαραίτητα μέτρα προστασίας ( έλεγχος γείωσης) . Με το έναυσμα της γεννήτριας καταγράφηκε τάση και πάρθηκε η πρώτη ενδεικτική τιμή . Η διαδικασία έχει ως εξής ...σε κάθε επίπεδο τάσης θα πραγματοποιούνται 3 δοκιμές αν γίνει διάσπαση ( κοινώς αποδεκτό και ως breakdown) τότε επέρχεται μια παύση 2min έτσι ώστε να μετριάσει η τάση εφόσον περάσουν, πέφτει η τάση κατά 2kV και συνεχίζεται η διαδικασία. Αν δεν παρατηρηθεί διάσπαση ,τότε γίνεται άνοδος της τάσης κατά 5 kV , και επαναλαμβάνεται η διαδικασία . Στόχος είναι οι καταγραφές δέκα τιμών με διάσπαση. Γίνεται σε πραγματικό χρόνο παρατηρείται στο παλμογράφο μέσω των ενδείξεων του. Προσοχή βέβαια θέλει η κλίμακα της τάσης απ' V σε kV. Βλέποντας τις μετρήσεις , όσο περνάει αυτό το στατικό φαινόμενο τόσο πιο πολύ καταπονείται το έλαιο και σε τιμές οι οποίες στο αρχικό στάδιο ήταν ανεπηρέαστο στο τελευταίο στάδιο υπήρχε διάσπαση.

Συνοψίζοντας, αλλάζοντας την συνδεσμολογία από θετική σε αρνητική πολικότητα επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία και καταγράφουμε πάλι παλμογραφήματα με κοινό στόχο τα breakdown.

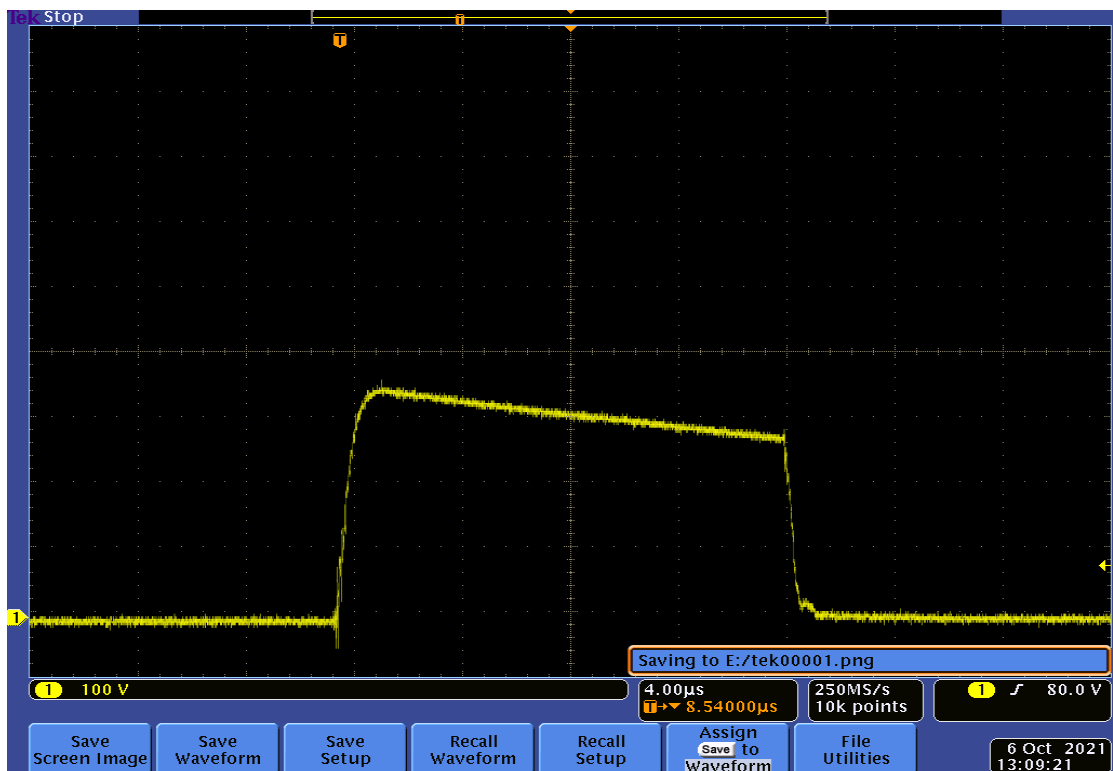
Οι παρακαλώ εικόνες αφορούν την κρουστική τάση . Πιο συγκεκριμένα ,  
( Εικ3 ,4 ,5) αντιστοιχούν σε θετικά breakbown των τιμών της τάσεων των kV,kV,kV

**ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ : 77,65kV**

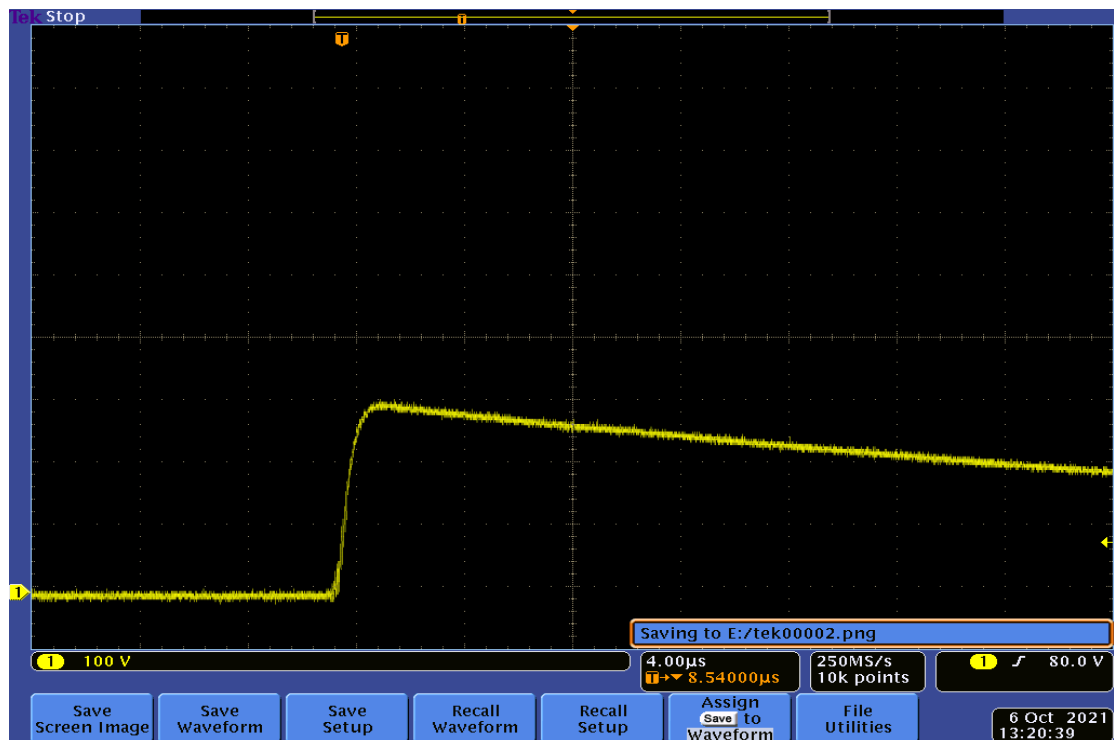
**ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΑΡΝΗΤΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ: -114,73kV**



ΕΙΚ3: Ενδεικτικό <breakdown> στη θετική πολικότητα με τάση διάσπασης 89 kV



ΕΙΚ4: Ενδεικτικό <breakdown> στη θετική πολικότητα με τάση διάσπασης 78kV



ΕΙΚ5: Ενδεικτικό μέτρηση στη θετική πολικότητα με τάση διάσπασης 65kV

### 2.3 ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΝΑΝΟΕΛΑΙΩΝ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ΣΕ ΜΟΝΩΤΙΚΟ ΕΛΑΙΟ FR3 ΣΕ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ 0.002% W/W ΚΑΙ 0.016% W/W.

Στις 08/11/21 πραγματοποιήθηκε η σύνθεση των δύο νανοελαίων Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε μονωτικό έλαιο FR3 σε συγκεντρώσεις 0.002% w/w και 0.016% w/w . Σε 450ml λαδιού περιέχεται 8.3mg Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και για το δεύτερο τοποθετήσαμε 450ml λαδιού περιέχεται 66.4 mg Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Αρχικά, ζυγίστηκαν σε ζυγαριά ακριβείας τα mg Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και ύστερα τοποθετήθηκαν μέσα στα έλαια με στόχο την ομογενοποίηση των δειγμάτων . Στη συνέχεια, τα υποβάλαμε σε υπερηχητική ανάδυσση ultra sonic σε λουτρό υπερήχων για 1μιση ώρα ενώ κάθε 30 λεπτά γινόταν παύση 15 λεπτών για να μην υπερθερμανθεί το ίδιο το έλαιο και το μηχάνημα. Η θερμοκρασία και η υγρασία στη συγκεκριμένη διαδικασία δεν επηρεάζουν τη διαδικασία. Στο τέλος της διαδικασίας όμως μετά το πέρας του χρόνου στα διαλύματα υπήρξε ίζημα με αποτέλεσμα να υποβληθούν εκ νέου σε μια διαδικασία magnetic stirring κι μετά τοποθετήθηκε στο δοχείο υπερηχητικής ανάδυσσης για μια ακόμα ώρα .



**Εικ6: Ζυγαριά ακριβείας PRECISA**

Στις 09/11/21 πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις της AC τάσης διάσπασης μονωτικού νανοελαίου σε συνθήκες θερμοκρασίας: 21.9°C υγρασίας : 64.8% (πραγματική υγρασία :13.5%) και πίεσης :755mmHg. Στη συνέχεια , βεβαιωθήκαμε ότι τα σκεύη που θα χρησιμοποιηθούν για τις μετρήσεις έχουν πλυθεί και έχουν καθαριστεί κατάλληλα πριν την έναρξη των μετρήσεων . Πιο αναλυτικά, τοποθετήσαμε το φυτικό έλαιο στο φούρνο (Εικ1)για 24 ώρες στους 100°C για να απορροφηθεί μεγάλο κομμάτι της υγρασίας η οποία είναι παράμετρος στο πείραμα . Στη συνέχεια , τοποθετείτε το έλαιο μέσα στη Κυψέλη με τις δύο μεταλλικές σφαίρες σε απόσταση 2.5 χιλιοστών η μία απ' την άλλη . Ύστερα η κυψέλη με το έλαιο θα εισέλθει στο μηχάνημα και θα ρυθμιστεί στο πρότυπο IEC 60156 με ονομαστική τάση μηχανήματος στα 100kV και συχνότητα διάσπασης τα 2kV/sec .Κάπως έτσι γίνεται το πρώτο βήμα εκκαθάρισης των ρύπων του ελαίου , χρειάζονται 5min έτσι ώστε να απομακρυνθούν οι φυσαλίδες. Εφόσον ολοκληρωθούν τα πρώτα πέντε λεπτά , γίνεται η πρώτη διάσπαση και ξεκινούν τα δέκα δεκάλεπτα σετ μετρήσεων του μονωτικού νανοελαίου. Να σημειωθεί ότι μεταξύ της κάθε μέτρησης μεσολαβούν δύο λεπτά για να απομακρυνθούν οι φυσαλίδες ενώ μεταξύ των σετ ,5 λεπτά για να απομακρυνθούν απ' τα ηλεκτρόδια . Αξίζει να σημειώσουμε ότι τα νανοσωματίδια είναι μονωτικά δηλαδή έχουν μικρή ηλεκτρική αγωγιμότητα και συμπεριφέρονται με συγκεκριμένο τρόπο . Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόζοντας ηλεκτρικό πεδίο στα άκρα του έλαιο τα



νανοσωματίδια , δημιουργείται πολωμένο φορτίο στην επιφάνεια των νανοσωματίδιων . Τα φορτία αυτά οδηγούν στη δημιουργία ενός φράγματος δυναμικού που παγιδεύει τα ηλεκτρόνια και τα φορτίζει αρνητικά . Η παγίδευση αυτή των ηλεκτρονίων επιβαρύνει τη διάδοσή μέσα στο διηλεκτρικό και οδηγεί στη βελτίωση της τάσης διάσπασης αν γίνει. Γνωρίζουμε ότι για να βελτιωθεί θα πρέπει τα ηλεκτρόνια αυτά να παγιδευτούν γρήγορα το οποίο γενικά δεν είναι ιδιότητα των μονωτικών σωματιδίων .

Η διαδικασία συνεχίστηκε και με τη δεύτερη μεγαλύτερη συγκέντρωση ακολούθησε η ίδια ακριβώς πειραματική διαδικασία και λάβαμε μετρήσεις .

Παρατηρήσαμε ότι οι μετρήσεις είναι ιδιαίτερα χαμηλές και αυτό ίσως οφείλεται ότι δεν έγινε σωστή ανάδευση.



Εικ7 : Λουτρό υπερήχων ELMA



Εικ.8:Διάφορες κατηγορίες δεξαμενών υπερήχων



Εικ 9: Νανοέλαιο Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε μονωτικό έλαιο εστέρα FR3 σε συγκεντρώσεις 0.002% (δεξιά) w/w και 0.016% w/w(αριστερά)



## 2.4 ΠΙΝΑΚΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 2.4.1 Μετρήσεις AC τάσης διάσπασης φυτικού ελαίου FR3

#### ΣΕΤ Νο1

67,8k V
62,2Kv
61,6Kv
67,3Kv
76,7kV
77,5kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:68,9Kv
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:6,9kV

#### ΣΕΤ Νο2

67,5k V
71,4kV
73,3kV
72,1kV
70,7kV
65,4kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:70,1Kv
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:3,0kV

#### ΣΕΤ Νο3

55,3k V
50,0kV
78,0kV
42,6kV
38,7kV
36,1kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:50,1Kv
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:15,4kV

#### ΣΕΤ Νο4

39,1k V
32,8kV
36,1kV
43,4kV
38,4kV
41,1kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:38,5Kv
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:3,7kV

**ΣΕΤ Νο5**

44,7k V
41,6kV
49,0kV
56,6kV
49,2kV
50,8kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:48,7Kv
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:5,2kV

**ΣΕΤ Νο6**

61,7k V
61,5kV
66,1kV
61,6kV
72,1kV
68,8kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:65,3Kv
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:4,5kV

**ΣΕΤ Νο7**

71,5k V
72,4kV
71,0kV
68,4kV
75,8kV
74,7kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:72,3Kv
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:2,7kV

**ΣΕΤ Νο8**

68,1k V
76,3kV
79,3kV
80,2kV
83,4kV
85,6kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:78,8KV
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:6,2kV

**ΣΕΤ Νο9**

87,6k V
85,6kV
79,7kV

88,5kV
88,0kV
86,1kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:85,9KV
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:3,2kV

#### **ΣΕΤ Νο10**

84,4k V
100,2kV
92,9kV
100,8V
88,2kV
85,8kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:37,0Kv
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:9,6kV

**ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΤΩΝ ΣΕΤ : 67,06kV**

**ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ: 3,8kV**

### **2.4.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΣΗΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΝΑΝΟΕΛΑΙΟΥ 0,016%W/W**

#### **ΣΕΤ Νο1**

28,2k V
29,2kV
29,8kV
34,0kV
30,3kV
32,5kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:30,7kV
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:2,2kV

#### **ΣΕΤ Νο2**

35,3k V
35,0kV
34,6kV
36,5kV
35,8kV
33,6kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:35,2Kv
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:1,0kV

#### **ΣΕΤ Νο3**

34,2k V
40,2kV
24,4kV
33,7kV
37,4kV
36,3kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:34,4Kv
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:5,4kV

#### ΣΕΤ Νο4

25k V
36,8kV
39,9kV
45,8kV
44,9kV
41,1kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:38,9Kv
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:7,6kV

#### ΣΕΤ Νο5

39,7k V
47,6kV
54,8kV
47,3kV
50,9kV
40,3kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:46,8Kv
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:5,9kV

#### ΣΕΤ Νο6

27,6k V
32,7kV
34,2kV
44,3kV
39,5kV
48,5kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:37,8kV
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:7,8kV

#### ΣΕΤ Νο7

38,1k V
47,9kV
46,2kV
37,3kV
41,8kV

35,8kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:41,1kV
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:5,1kV

**ΣΕΤ Νο8**

38k V
37,4kV
39,6kV
40,6kV
38,8kV
40,3kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:39,1kV
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:1,3kV

**ΣΕΤ Νο9**

42,7k V
40,0kV
41,1kV
46,2kV
42,6kV
42,2kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:42,5kV
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:2,1kV

**ΣΕΤ Νο10**

48,9k V
52,0kV
50,0kV
49,5kV
48,9kV
53,2kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:50,4kV
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:1,8kV

**ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΤΩΝ ΣΕΤ : 39,97kV**  
**ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ: 4,02kV**

**2.4.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΣΗΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΝΑΝΟΕΛΑΙΟΥ 0,0002%W/W**

**ΣΕΤ Νο1**

50,8k V
48,0kV
31,1kV
31,5kV
29,7kV
30,9kV

ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:37,0kV
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:9,6kV

#### ΣΕΤ Νο2

27,5k V
30,4kV
32,8kV
36,5kV
32,5kV
31,2kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:31,8kV
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:3,0kV

#### ΣΕΤ Νο3

42,9k V
37,4kV
47,4kV
49,2kV
47,6kV
44,7kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:44,9kV
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:4,3kV

#### ΣΕΤ Νο4

49,2k V
45,8kV
51,7kV
45,6kV
33,9kV
30,9kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:42,8kV
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:8,4kV

#### ΣΕΤ Νο5

31,6V
35,0kV
31,7kV
31,8kV
36.7kV
37.8kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:34,1kV
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:2,8kV

**ΣΕΤ Νο 6**

49,9k V
48,5kV
53,4kV
47,2kV
50,9kV
47,2kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:49,5Kv
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:2,4kV

**ΣΕΤ Νο7**

55,9k V
49,4kV
55,5kV
45,1kV
48,6kV
48,4kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:50,5Kv
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:4,3kV

**ΣΕΤ Νο8**

42,4k V
34,1kV
33,2kV
31,2kV
33,5kV
37,7kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:35,4Kv
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:4,0kV

**ΣΕΤ Νο9**

41.9k V
41,4kV
49,4kV
49,5kV
45,7kV
49,3kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:46,2Kv
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:3,8kV

**ΣΕΤ Νο10**

45,7k V
48,2kV
41,5kV
38,3kV
38,0kV
47,3kV
ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ:43,2kV
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ:4,5kV

**ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΤΩΝ ΣΕΤ : 41,54kV****ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ: 8,95kV**



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

### 3.1 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η τάση διάσπασης της υγρής μόνωσης ενός μετασχηματιστή ισχύος δεν μπορεί εύκολα να εκτιμηθεί, λόγω του εύρους της διακύμανσης και της διασποράς. Πιθανώς, αυτά τα φαινόμενα προκαλούνται από την παρουσία μιας μετρήσιμης ποσότητας ακαθαρσιών στο έλαιο μετασχηματιστή ισχύος. Τα μονωτικά έλαια που χρησιμοποιούνται σε μετασχηματιστές ισχύος περιέχουν 10 έως 10.000 τεμάχια στερεών ακαθαρσιών ανά 100 ml. Στατιστικές τεχνικές, παραμετρικές και μη παραμετρικές, έχουν εφαρμοστεί εκτεταμένα στη μελέτη περιπτώσεων διηλεκτρικής βλάβης. Οι παραμετρικές τεχνικές υποθέτουν ότι τα δεδομένα μπορούν να μοντελοποιηθούν με θεωρητική κατανομή, ενώ οι μη παραμετρικές δοκιμές δεν προχωρούν σε αυτήν την παραδοχή. Δύο κοινές παραμετρικές κατανομές που χρησιμοποιούνται ευρέως για την περιγραφή της τάσης διάσπασης υγρών διηλεκτρικών είναι οι Gaussian (Normal) και η Weibull. Η κατανομή της πιθανότητας διάσπασης των διαλυμάτων λαδιού μπορεί να θεωρηθεί κανονική, εάν η πιθανότητα αυτή κυμαίνεται από 10% έως 90%. Ωστόσο, όταν η πιθανότητα διάσπασης είναι ιδιαίτερα χαμηλή, συνήθως χρησιμοποιείται η κατανομή Weibull. Επιπροσθέτως, σε πρόσφατες έρευνες αναφέρεται ότι η Weibull κατανομή περιγράφει καλύτερα τα αποτελέσματα της τάσης διάσπασης υγρών διηλεκτρικών, ενώ σε άλλες γνωστοποιείται ότι η κανονική κατανομή είναι συμβατή με τα αποτελέσματα. Ωστόσο και οι δυο ανωτέρω κατανομές αποτυγχάνουν στην εκτίμηση της τάσης διάσπασης (υπό εναλλασσόμενη τάση) στις χαμηλές πιθανότητες. Σκοπός της στατιστικής ανάλυσης της τάσης διάσπασης ενός διηλεκτρικού υλικού είναι να οριστεί το επίπεδο τάσης, στο οποίο ο κίνδυνος να πραγματοποιηθεί διάσπαση του υλικού βρίσκεται σε αποδεκτά χαμηλό βαθμό. Με τη χρήση της Gaussian (κανονική) κατανομής αυτό μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση του δείγματος δεδομένων. Η κανονική κατανομή υποθέτει ότι τα δεδομένα είναι συμμετρικά κατανομημένα γύρω από το μέσο και υπάρχει ορισμένος αριθμός ακραίων τιμών γύρω από τη κατανομή. Η συμμετρία των δεδομένων προσδιορίζεται ποσοτικά από τη στρέβλωση και η ποσότητα των ακραίων τιμών δίνεται από τη κύρτωση. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η τυπική απόκλιση των δεδομένων υπολογίζεται από ολόκληρο το δείγμα, και ότι μόνο η περιοχή του γραφήματος στα αριστερά του μέσου όρου χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της τάσης αντοχής, η ασυμμετρία αυτή μειώνει την ακρίβεια της εκτίμησης της τάσης αντοχής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η Gaussian κατανομή να μην θεωρείται έγκυρη όταν η πιθανότητα διάσπασης είναι χαμηλή. Επιπλέον, η Gaussian κατανομή δεν λαμβάνει υπόψη το πραγματικό μηχανισμό αποτυχίας εν αντιθέσει με τη Weibull κατανομή.

Όπως παρουσιάζεται και παραπάνω, το έλαιο μετασχηματιστή ισχύος περιέχει ένα μεγάλο αριθμό ακαθαρσιών, ο οποίος μπορεί να γίνει να συντελέσει υπέρ της διάσπασής του. Κατά συνέπεια, θεωρούμε πως το μοντέλο διάσπασης βασίζεται στην ιδέα ότι η διάσπαση θα πραγματοποιηθεί στο ασθενέστερο σημείο.

1. Εάν ο όγκος λαδιού στο διάκενο, στο οποίο ασκείται ένα ομοιόμορφο πεδίο, χωριστεί σε ίσες μονάδες όγκου, έχουν την ίδια πιθανότητα διάσπασης.

2. Η διάσπαση ενός οποιουδήποτε όγκου, που προκύπτει από μια τέτοια ισότιμη διαίρεση, προκαλεί τη διάσπαση των υπόλοιπων μονάδων όγκου οδηγώντας σε κατάρρευση όλης της υγρής μόνωσης. Έστω ότι η πιθανότητα διάσπασης ολόκληρου του διακένου είναι P και P0 η αντίστοιχη πιθανότητα για κάθε επιμέρους μονάδα όγκου. Η εξίσωση

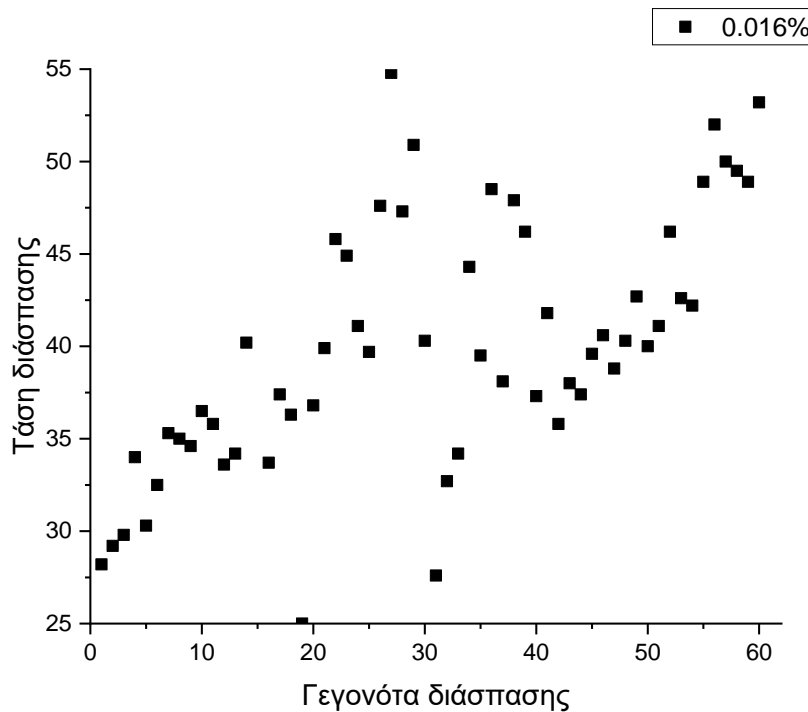
$$1-P=(1-P_0)^n$$

προκύπτει από το θεώρημα πολλαπλασιασμού της πιθανότητας. Αν το διάκενο χωριστεί στις μικρότερες δυνατές μονάδες όγκου, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να ξαναγραφεί ως εξής:

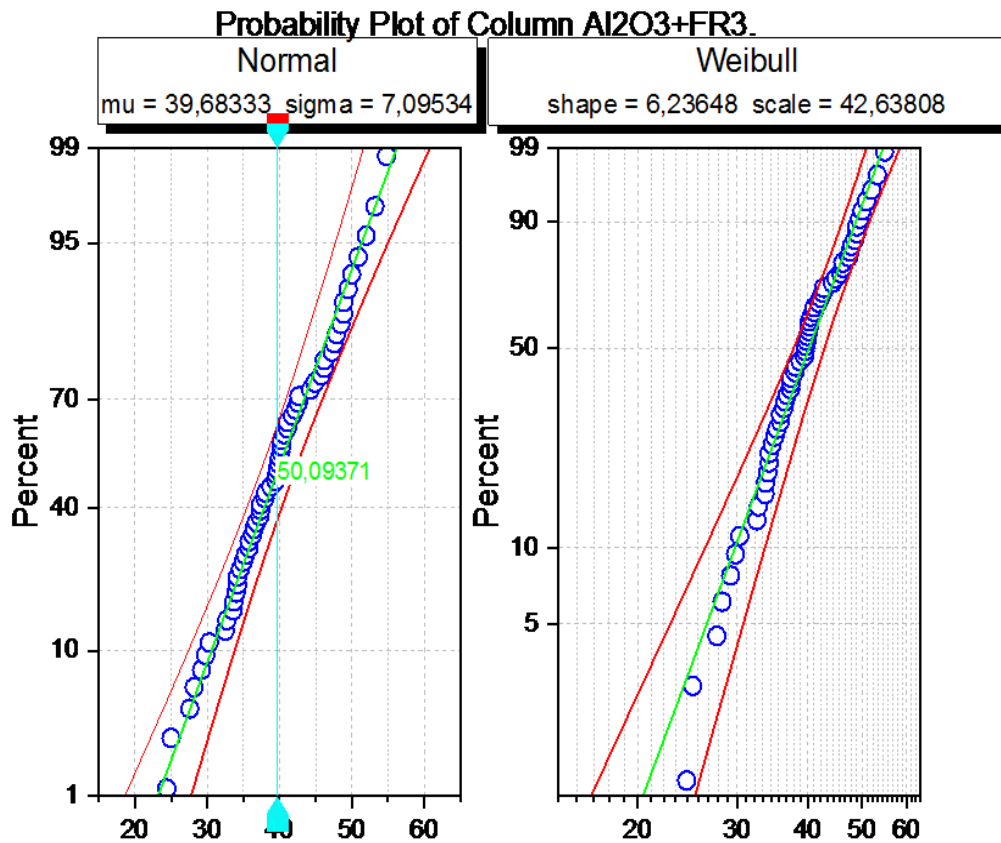
$$\ln(1-P)=-VP_0$$

Όπου το P0 μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της τάσης E, δηλαδή  $P_0 = f(E)$ . Ο Weibull αντιλήφθηκε ότι η σχέση αυτή θα μπορούσε να προσεγγιστεί με μια σταδιακά αυξανόμενη καμπύλη και θα αντικαταστήσει με τον όρο  $(E/E_1)^m$  το P0. Στον όρο αυτό, το E1 είναι μια σταθερά η οποία καθορίζει την ουσιαστική αντοχή του υλικού, που ονομάζεται παράμετρος "κλίμακα" (scale), και m είναι ένας συντελεστής ο οποίος αφορά την ομοιομορφία των μικροατελειών, που ονομάζεται παράμετρος "σχήμα" (shape).

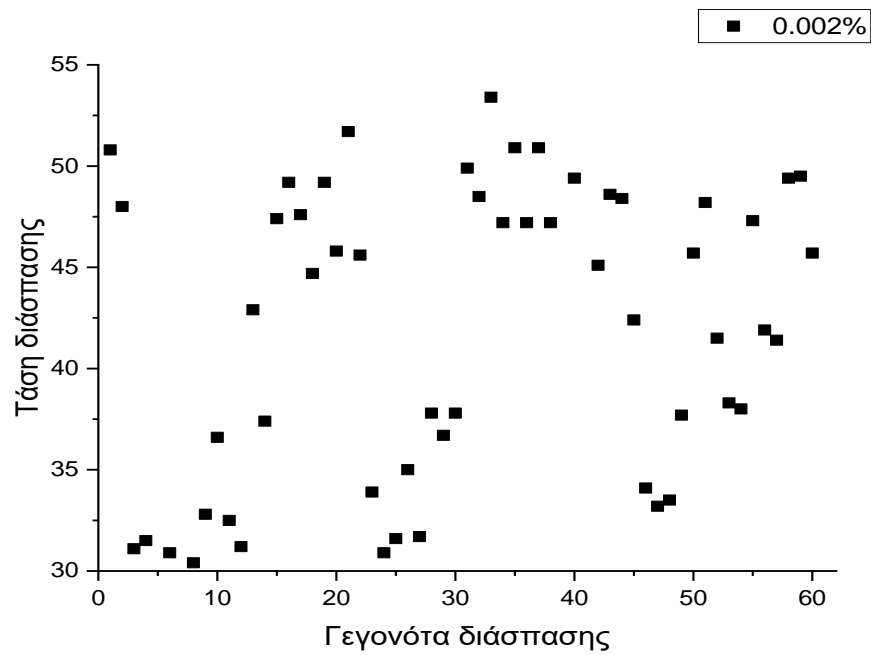
### 3.1.1 ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΣ ΤΑΣΗΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΝΑΝΟΕΛΑΙΟΥ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ 0,016% AL2O3 ΚΑΙ FR3



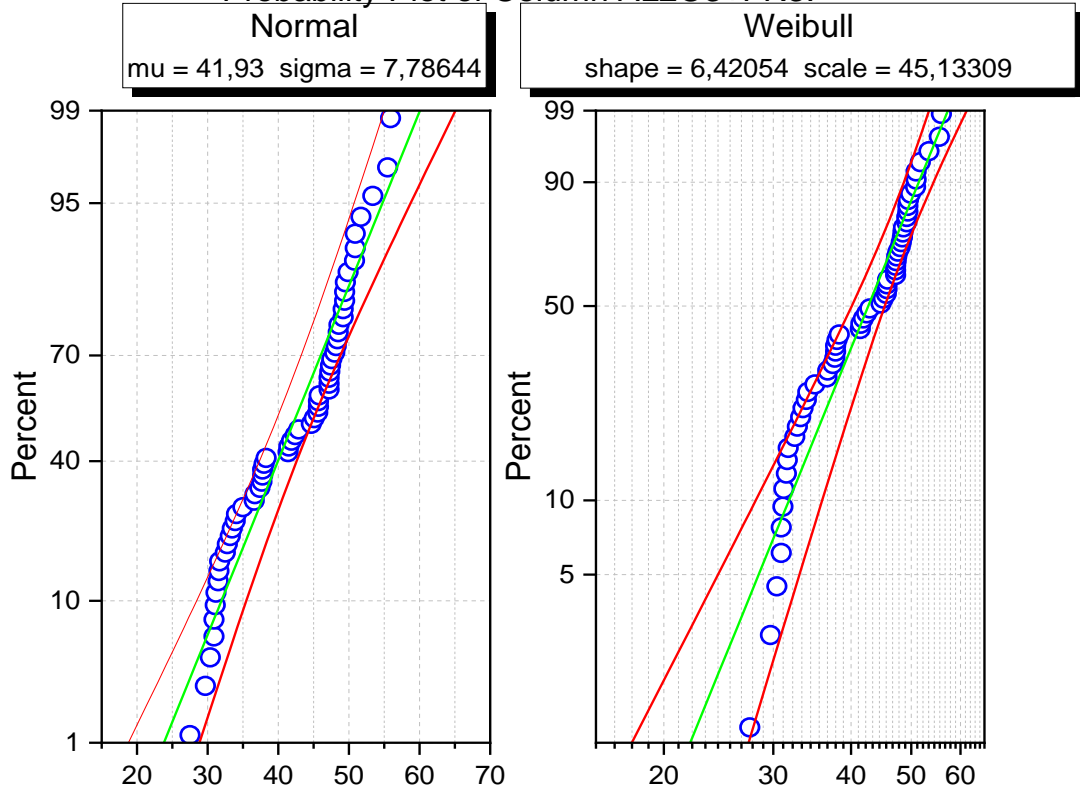
Με μια πρώτη ματιά γίνεται αντιληπτό ότι δεν υπάρχει σαφής διάκριση ως προς το ποια κατανομή περιγράφει καλύτερα τα αποτελέσματα της τάσης διάσπασης για τα δύο νανοέλαια. Για τις συγκεντρώσεις 0,002% και 0,016% η Weibull επιτυγχάνει τη καλύτερη προσέγγιση και για τα δυο νανοέλαια, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι τόσο η μεγαλύτερη, όσο και η μικρότερη συγκέντρωση περιγράφεται καλύτερα από τη κανονική κατανομή. Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις πιθανότητας (P-P plots), που θα βοηθήσουν να αξιολογήσουμε το βαθμό στον οποίο συμφωνούν τα πειραματικά δεδομένα με τις κατανομές Normal και Weibull



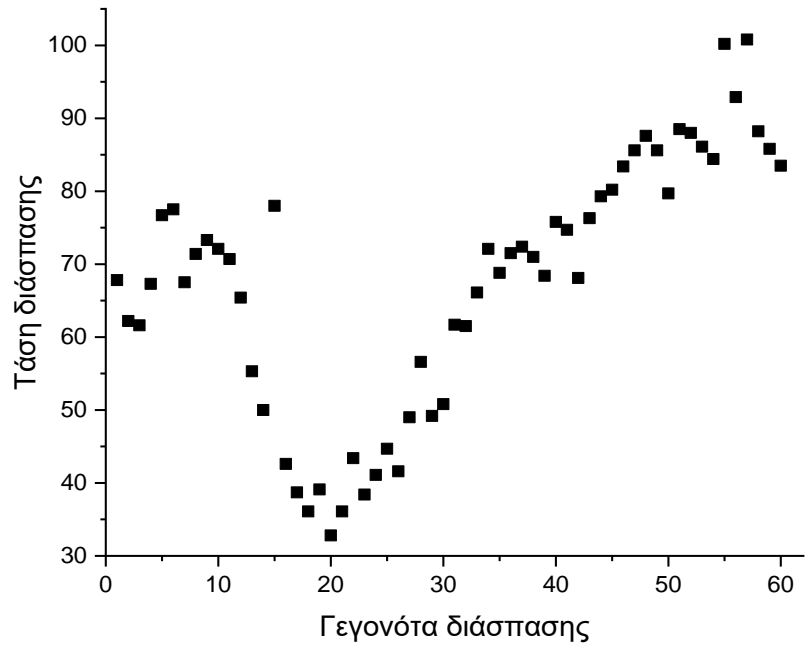
3.1.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΣ ΤΑΣΗΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΝΑΝΟΕΛΑΙΟΥ  
ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ 0,002% AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ΚΑΙ FR3



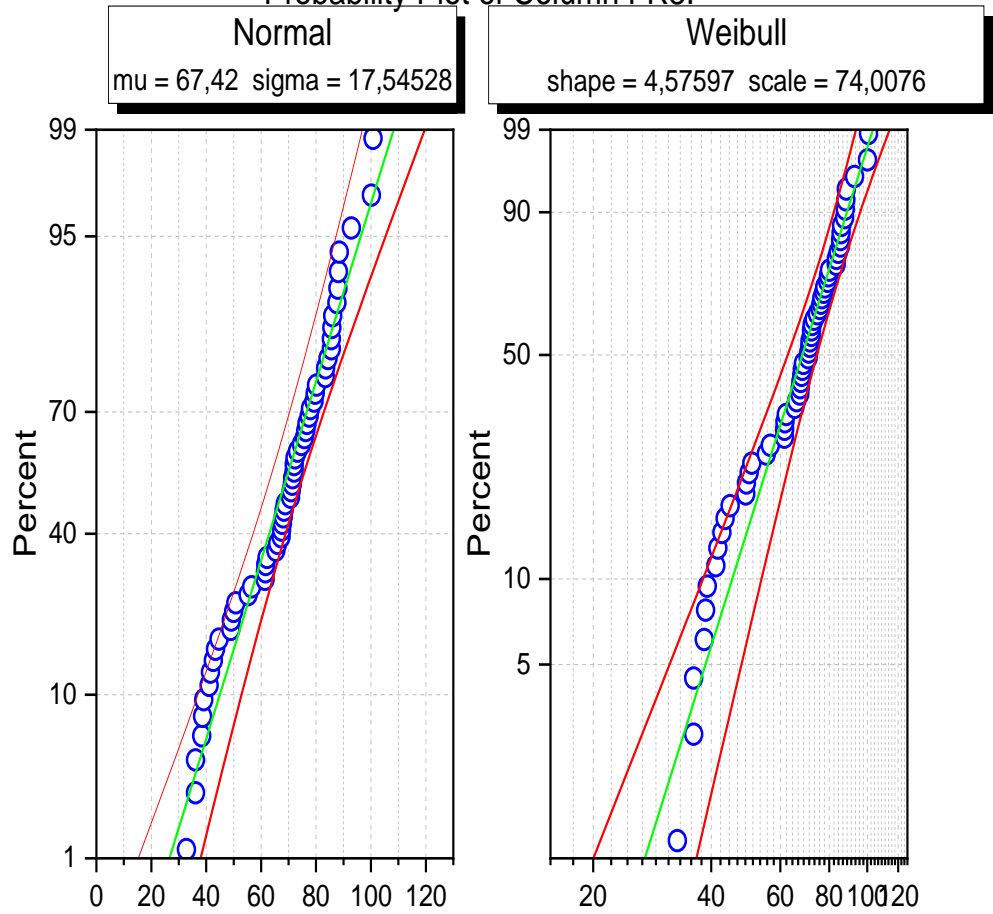
Probability Plot of Column AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+FR3.



### 3.1.3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΣ ΤΑΣΗΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΦΥΤΙΚΟΥ ΕΛΑΙΟΥ FR3



Probability Plot of Column FR3.



## 3.2

### ΣΧΟΛΙΑ -ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ:

**ΠΙΝΑΚΑΣ I**

	ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ (kV)	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ (kV)	P-VALUE NORMAL	P-VALUE WEIBULL
ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ 0,016% AL3O2 και FR3	36,68	7,095	0,65	0,21
ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ 0,002% AL3O2 και FR3	41,93	7,78	2,13E-4	<0,01
ΦΥΤΙΚΟ ΕΛΑΙΟ FR3	67,42	17,54	0,015	0,044

**ΠΙΝΑΚΑΣ II**

	NORMAL (kV)	WEIBULL(kV)
ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ 0,016% AL3O2 και FR3 για 1% ΤΑΣΗ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ	23,2	20,4
ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ 0,016% AL3O2 και FR3 για 10% ΤΑΣΗ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ	30,6	29,7
ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ 0,016% AL3O2 και FR3 για 50% ΤΑΣΗ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ	39,7	40,2
ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ 0,002% AL3O2 και FR3 για 1% ΤΑΣΗ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ	-	-
ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ 0,002% AL3O2 και FR3 για 10% ΤΑΣΗ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ	-	-
ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ 0,002% AL3O2 και FR3 για 50% ΤΑΣΗ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ	-	-
ΦΥΤΙΚΟ ΕΛΑΙΟ FR3 για 1% ΤΑΣΗ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ	26,6	27,1
ΦΥΤΙΚΟ ΕΛΑΙΟ για 10% ΤΑΣΗ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ	45	45,3
ΦΥΤΙΚΟ ΕΛΑΙΟ για 50% ΤΑΣΗ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ	67,4	68,3

- ✚ Παρατηρούμε ότι για τη συγκέντρωση 0,002 Al3O2 και FR3 δε μπορούμε να λάβουμε κατανομές πιθανοτήτων λόγω χαμηλών τιμών, μικρότερων δηλαδή του 0,01. Δεν μπορούν τα περιγραφούν τα δεδομένα σε αυτές τις παραστάσεις normal

και weibull αλλά και με τη συγκεκριμένη παραδοχή 0,01 . Πιο αναλυτικά, το p-value όπως υπολογίστηκε είναι μικρότερο τόσο για τη normal όσο και για τη weibull συνεπώς τα δεδομένα δεν μπορούν να προγραφούν, για αυτό ,δε υπολογίστηκαν οι τάσεις διάσπασης στα επίπεδα ποσοστών για τις τιμές 1 , 10 , 50.

- ✚ Είναι γεγονός και σύμφωνα με τις γραφικές παραστάσεις ότι τα νανοσωματίδια δε βοήθησαν στη διάσπαση γιατί παρατηρούμε μείωση .Απ' την άλλη μεριά όσο αυξάνεται η συγκέντρωση τόσο μειώνεται και πέφτει η τάση γεγονός που προκαλεί συσσωμάτωση. Αυτό δείχνει πόσο σημαντική είναι η συσσωμάτωση και η διαδικασία της ανάδευσης. Δυστυχώς, κατά τη διαδικασία της ανάδευσης δεν είχαμε τα επιθυμητά αποτελέσματα όπως αναφέρεται και παραπάνω στη πειραματική διαδικασία, καθώς παρατηρήθηκε ίζημα και υπολείμματα οπότε υποβλήθηκε σε μαγνητική αφόδευση και οι επιπτώσεις σκιαγραφούνται και στα γραφήματα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

#### Πηγές απ' επιστημονικά βιβλία :

- Υψηλές Τάσεις ,Εκδόσεις : Τζιόλα (2η έκδοση ), Συγγραφείς : E. Kuffel , J kuffel , W. S. Zaengl
- Υψηλές Τάσεις ,Εκδόσεις : Τζιόλα (3η έκδοση ), Συγγραφείς: Λάμπρος Οικονόμου, Γιώργιος Φώτης, Χρήστος Χριστοδούλου
- Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας: Εκδόσεις: Τζιόλα (2η έκδοση ), Συγγραφέας: Παντελής Μαλατέστας
- Εισαγωγή στα Ηλεκτρονικά Ισχύος , Εκδόσεις : Τζιόλα( 3η έκδοση) Συγγραφείς : Robbins, Mohan

#### Πηγές απ επιστημονικά άρθρα , πηγές και διατριβές :

- Διπλωματικές εργασίες φοιτητών του τμήματος ηλεκτρολόγων μηχανικών Πάτρας
- D.Martin , Z.D. Wang: university of Manchester about statical analysis
- Statical investigation of AC breakdown

#### Πηγές απ ιστότοπους :

-

<https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://repository.library.teiwest.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/6271/%25CE%2592%25CE%2599%25CE%259F%25CE%2594%25CE%2599%25CE%2591%25CE%25A3%25CE%25A0%25CE%25A9%25CE%259C%25CE%2595%25CE%259D%25CE%2591%2520%25CE%25A5%25CE%2593%25CE%25A1%25CE%2591-%25CE%259C%25CE%259F%25CE%259D%25CE%25A9%25CE%25A4%25CE%2599%25CE%259A%25CE%2591%2520%25CE%259C%25CE%2595%2520%25CE%25A0%25CE%25A1%25CE%259F%25CE%25A3%25CE%2598%25CE%2597%25CE%259A%25CE%2597%2520%25CE%259D%25CE%2591%25CE%259D%25CE%259F%2520%25CE%25A5%25CE%259B%25CE%2599%25CE%259A%25CE%25A9%25CE%259D.%2520%25CE%2597%25CE%259B%25CE%2595%25CE%259A%25CE%25A4%25CE%25A1%25CE%2599%25CE%259A%25CE%2595%25C>



[E%25A3%2520%25CE%2599%25CE%2594%25CE%2599%25CE%259F%25CE%25A4%25CE%2597%25CE%25A4%25CE%2595%25CE%25A3%2520%25CE%259A%25CE%2591%2520%25CE%259C%25CE%2597%25CE%25A7%25CE%2591%25CE%259D%25CE%2599%25CE%25A3%25CE%259C%25CE%259F%25CE%2599%2520%25CE%2594%25CE%2599%25CE%2591%25CE%25A3%25CE%25A0%25CE%2591%25CE%25A3%25CE%2597%25CE%25A3..pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy&ved=2ahUKEwj62eLuy\\_X8AhVSO-wKHaI6DYoQFnoECBEQAQ&usg=AOvVaw1Mq0eui72YOzI1hzMyoqOZ](https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://nemertes.library.upa.tras.gr/items/3ae4f2f7-9e5b-4a90-af91-0e2e45dcdee3&ved=2ahUKEwj62eLuy_X8AhVSO-wKHaI6DYoQFnoECBEQAQ&usg=AOvVaw1Mq0eui72YOzI1hzMyoqOZ)

-

[https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://nemertes.library.upa.tras.gr/items/3ae4f2f7-9e5b-4a90-af91-0e2e45dcdee3&ved=2ahUKEwj62eLuy\\_X8AhVSO-wKHaI6DYoQFnoECBMQAQ&usg=AOvVaw1bSH4ZEcp6ERIYSofXH2a](https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://nemertes.library.upa.tras.gr/items/3ae4f2f7-9e5b-4a90-af91-0e2e45dcdee3&ved=2ahUKEwj62eLuy_X8AhVSO-wKHaI6DYoQFnoECBMQAQ&usg=AOvVaw1bSH4ZEcp6ERIYSofXH2a)

[-el.m.wikipedia.org](https://el.m.wikipedia.org)

<https://el.m.wikipedia.org> › wiki

Διηλεκτρικό - Βικιπαίδεια

-

<https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://eclass.teipir.gr/openeclass/modules/document/file.php/ELEC105/I.%2520%25CE%2594%25CE%25B9%25CE%25B1%25CF%2586%25CE%25AC%25CE%25BD%25CE%25B5%25CE%25B9%25CE%25B5%25CF%2582%2520%25CE%259C%25CE%25B1%25CE%25B8%25CE%25AE%25CE%25BC%25CE%25B1%25CF%2584%25CE%25BF%25CF%2582%2520%25CE%25A3%25CF%2584%25CE%25B5%25CF%2581%25CE%25B5%25CE%25AC%2520%25CE%259C%25CE%25BF%25CE%25BD%25CF%2589%25CF%2584%25CE%25B9%25CE%25BA%25CE%25AC%2520%25E2%2580%2593%2520%25CE%2593%25CE%25AE%25CF%2581%25CE%25B1%25CE%25BD%25CF%2583%25CE%25B7%2520%25CE%25BA%25CE%25B1%25CE%25B9%2520%25CE%2594%25CE%25B9%25CE%25AC%25CF%2583%25CF%2580%25CE%25B1%25CF%2583%25CE%25B7.pdf&ved=2ahUKEwiKjbHbzPX8AhXRO-wKHUwxD4oQFnoECBIQAQ&usg=AOvVaw25CujzcpdwjW28j6W9Pndq>

-

<https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://my.electricianexp.com/el/chto-takoe-elektricheskaya-prochnost-izolyacii.html&ved=2ahUKEwiKjbHbzPX8AhXRO-wKHUwxD4oQFnoECFMQAQ&usg=AOvVaw2IGkwJlrWI1qQtBuj7Ecbd>

-

<https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://www.sertifikasyon.com/el/hizmet/dielectric-strength-testleri/&ved=2ahUKEwiKjbHbzPX8AhXRO-wKHUwxD4oQFnoECDQQAQ&usg=AOvVaw2uZobNaGkNLPRIzk3oA6Fn>

[-el.m.wikipedia.org](https://el.m.wikipedia.org)

<https://el.m.wikipedia.org> › wiki

Νανοτεχνολογία - Βικιπαίδεια

-

[https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://ikee.lib.auth.gr/record/297629%3FIn%3DeI&ved=2ahUKEwjQ\\_pqozfX8AhU0JMUKHcjQDooQFnoEAcQAQ&usg=AOvVaw2CwMbidhKxPb-W8ftFXMuv](https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://ikee.lib.auth.gr/record/297629%3FIn%3DeI&ved=2ahUKEwjQ_pqozfX8AhU0JMUKHcjQDooQFnoEAcQAQ&usg=AOvVaw2CwMbidhKxPb-W8ftFXMuv)