



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Διηλεκτρικές ιδιότητες σύνθετων πολυμερών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σταυρούλα Ζησιμοπούλου

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Διηλεκτρικές ιδιότητες σύνθετων πολυμερών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σταυρούλα Ζησιμοπούλου

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....

Αθήνα, Ιούνιος 2016

.....
Σταυρούλα Ζησιμοπούλου

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

Copyright © Σταυρούλα Ζησιμοπούλου, 2016.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Θέμα της διπλωματικής εργασίας είναι οι διηλεκτρικές ιδιότητες σύνθετων πολυμερών, με την αναγκαιότητα ενασχόλησης με το συγκεκριμένο ζήτημα να προκύπτει από το μεγάλο εύρος των εφαρμογών τους και την ανάγκη επίτευξης επιθυμητών ιδιοτήτων ανά εφαρμογή. Για το σκοπό αυτό έγινε η σύγκριση δοκιμίων που έχουν παρασκευαστεί από σκέτη ρητίνη με αντίστοιχα δοκίμια που έχουν προσμίξεις σωματιδίων οξειδίου του αργιλίου ή οξειδίου του σιδήρου, σε διαφορετικά ποσοστά συγκέντρωσης και στη συνέχεια μετρήθηκε η μονωτική τους ικανότητα μέσω των μεγεθών της διηλεκτρικής σταθεράς και της εφαπτόμενης απωλειών, εφαρμόζοντας τάση σε χαμηλές - βιομηχανικές συχνότητες (20Hz- 1MHz) και σε ψηλές- τηλεπικοινωνιακές συχνότητες (1MHz- 1GHz).

Όσον αφορά στις υψηλές συχνότητες παρατηρήθηκε πολύ μικρή αύξηση της εφαπτομένης απωλειών για πρόσμιξη συγκέντρωσης του 5% αλουμίνας σε σχέση με το δοκίμιο της σκέτης ρητίνης, αυξητική μεταβολή της διηλεκτρικής σταθεράς σε σχέση με την πρόσμιξη με αλουμίνα, όχι όμως αναλογικά με την ποσότητα αυτής της πρόσμιξης, μικρή απόκλιση των τιμών της εφαπτομένης απωλειών για την περίπτωση προσμίξεων οξειδίου του σιδήρου μόνο στη συγκέντρωση του 5%, ενώ όσον αφορά στη μεταβολή της διηλεκτρικής σταθεράς για τις προσμίξεις με οξείδιο του σιδήρου η επίδραση των προσμίξεων ήταν πολύ μικρή (και για συγκεντρώσεις προσμίξεων μεγαλύτερες του 1%).

Στην περίπτωση των χαμηλών συχνοτήτων η εφαπτομένη απωλειών όσον αφορά στις προσμίξεις αλουμίνας παρουσίασε συντονισμό στο εύρος συχνοτήτων 20-100 Hz, με τη μεγαλύτερη τιμή να σχετίζεται με τη συγκέντρωση του 5% (χωρίς όμως να υφίσταται αναλογική μεταβολή με την αύξηση της συγκέντρωσης πρόσμιξης), ενώ στο φάσμα 100 Hz – 1MHz η τιμή της εφαπτομένης απωλειών ήταν μικρότερη για κάθε πρόσμιξη σε σχέση με αυτή της καθαρής ρητίνης. Ανάλογες παρατηρήσεις ισχύουν και για την περίπτωση της διηλεκτρικής σταθεράς όσον αφορά στις προσμίξεις αλουμίνας και οξειδίου του σιδήρου. Τέλος, η μεταβολή της εφαπτομένης απωλειών της πρόσμιξης με οξείδιο του σιδήρου σε σχέση με την καθαρή ρητίνη είναι πολύ μικρή.

Λέξεις – Κλειδιά: Διηλεκτρικές ιδιότητες, Διηλεκτρική Σταθερά, Εφαπτομένη Απωλειών, Αλουμίνα, Οξείδιο του σιδήρου, Εποξειδική ρητίνη

Abstract

This study deals with the dielectric properties of composite polymers. The necessity of dealing with this subject comes from the width of their application and the fact that in every application certain properties have to be reached. For this reason, manufactured samples of epoxic resin were compared with correspond samples with additions of alumina and iron oxide (in different concentrations) according to their insulating capability through the variables of dielectric constant and loss tangent. The measurements were done in low, industrial frequencies (20Hz-1Mz) and in high telecommunications frequencies (1MHz-1GHz).

Relatively to the high frequencies the observations that came up after the measurements were: a small increment of loss tangent for addition of 5% of alumina, augmentative but not proportional change of dielectric constant according to the different additions, small deviation of loss tangent for additions of iron oxide only in the case of 5% concentration and very small effect on dielectric constant by additions of iron oxide (by concentrations higher than 1%).

In the case of low frequencies the loss tangent showed maximum value in the spectrum of 20-100 Hz and in the frequencies 100 Hz – 1MHz this value was lower than the correspond of any addition. The same observations took place in case of the dielectric constant and the additions of alumina and iron oxide. Finally the change of the loss tangent in the case of iron oxide addition was very small.

Key – Words: Dielectric Properties, Dielectric Constant, Loss Tangent, Alumina, Iron oxide, Epoxy resin

Πρόλογος

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτροτεχνικών Υλικών του τομέα Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Για την πραγματοποίησή της θα ήθελα να ευχαριστήσω βαθύτατα τον καθηγητή μου στην Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, κύριο Κωνσταντίνο Δέρβο, που μου ανάθεσε την παρούσα διπλωματική εργασία και ο οποίος με τις γνώσεις και την εμπειρία του, με βοήθησε στην ολοκλήρωση της. Ευχαριστώ επίσης την καθηγήτρια κυρία Παναγιώτα Βασιλείου, καθηγήτρια της σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ για την τεχνογνωσία και την διάθεση του επιστημονικού εξοπλισμού που απαιτούνταν για την πραγματοποίηση του πρώτου μέρους του πειραματικού σταδίου της εργασίας, καθώς και τον Υποψήφιο Διδάκτωρ, κύριο Γιώργο Παπαλαμπρή διπλωματούχο Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του ΕΜΠ, για την αδιάλειπτη βοήθεια του στην διεκπεραίωση της διπλωματικής εργασίας μου.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου· την μητέρα μου Κωνσταντίνα και τον αδελφό μου Βασίλη που με στήριξαν καθώς και τον άντρα μου Χριστόφορο που με υπομονή και σεβασμό στάθηκε δίπλα μου πολύτιμος βοηθός.

Αφιερώνω την παρούσα εργασία, που με την ολοκλήρωση της ολοκληρώνεται έτσι και η πολυετής προσπάθεια απόκτησης του πτυχίου μου, στον πατέρα μου Δημήτρη που υπήρξε και η αιτία για τις σπουδές μου.

Θέμα της διπλωματικής εργασίας είναι οι διηλεκτρικές ιδιότητες σύνθετων πολυμερών και η αναγκαιότητα ενασχόλησης με το συγκεκριμένο ζήτημα, προκύπτει από το μεγάλο εύρος των εφαρμογών που χαρακτηρίζει τη συγκεκριμένη κατηγορία υλικών. Στόχος της εργασίας είναι η κατανόηση των συγκεκριμένων ιδιοτήτων, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο, καθώς και ο εντοπισμός των πεδίων εφαρμογής τους, καταγράφοντας διαθέσιμες τεχνικές και ανιχνεύοντας μελλοντικές προοπτικές. Αντικείμενο της εργασίας είναι οι διηλεκτρικές ιδιότητες σύνθετων πολυμερών και συγκεκριμένα του οξειδίου του αργιλίου Al_2O_3 και του σιδήρου Fe_2O_3 και το πώς τα ποσοστά πρόσμιξης επηρεάζουν τη συμπεριφορά τους.

Η δομή της εργασίας συνοψίζεται στις εξής ενότητες:

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στα σύνθετα υλικά και τα πολυμερή, ορίζοντας τις αντίστοιχες έννοιες, αναφέροντας τη σχετική ιστορική τους εξέλιξη και καταγράφοντας τις διάφορες υφιστάμενες κατηγορίες τους. Επίσης περιγράφεται το υλικό της μήτρας του σύνθετου πολυμερούς που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία, η εποξειδική ρητίνη ως προς το υλικό σύστασης και τις ιδιότητές του.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα υλικά πρόσμιξης, δηλαδή το τριοξείδιο του αργιλίου (αλουμίνα) και το τριοξείδιο του σιδήρου, ως προς τις βασικές τους ιδιότητες, τη χημική τους σύσταση, τη διαδικασία παραγωγής τους και τις εφαρμογές τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και των διηλεκτρικών μεγεθών, έτσι ώστε να δημιουργηθεί το θεωρητικό υπόβαθρο για το πειραματικό μέρος που ακολουθεί.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται τα υλικά και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατασκευή δοκιμών για το πειραματικό μέρος της εργασίας, και αφορούν την έκχυση σωματιδίων οξειδίου του αργιλίου και σιδήρου σε διαφορετικά ποσοστά συγκέντρωσης σε μήτρα εποξειδικής ρητίνης καθώς και η αντίστοιχη διαδικασία που ακολουθήθηκε για την μέτρηση της μονωτικής τους ικανότητας μετά την εφαρμογή τάσης σε χαμηλές - βιομηχανικές συχνότητες (20Hz - 1MHz) και σε υψηλές- τηλεπικοινωνιακές συχνότητες (1MHz- 1GHz). Η έκφραση της μονωτικής ικανότητας έγινε μέσω των τιμών της μιγαδικής διηλεκτρικής σταθεράς (k) και των δύο συνιστωσών της (πραγματικής k' (διηλεκτρική σταθερά) και φανταστικής k'') καθώς και της επαπτομένης απωλειών.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα ευρήματα της πειραματικής διαδικασίας καθώς και η ανάλυσή τους. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο εξάγονται τα σχετικά συμπεράσματα με βάση όλα τα προαναφερόμενα στοιχεία και διατυπώνονται προτάσεις αλλά και σημεία που χρήζουν περαιτέρω μελλοντικής έρευνας.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	6
Abstract	7
Πρόλογος	8
Λίστα Πινάκων	13
Λίστα Σχημάτων.....	13
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ, ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΚΑΙ	
ΡΗΤΙΝΕΣ	15
1.1 Σύνθετα υλικά.....	15
1.1.1 Παραγωγή σύνθετων υλικών.....	15
1.1.2 Κατηγοριοποίηση σύνθετων υλικών	16
1.2 Πολυμερή	19
1.2.1 Ιστορική αναδρομή των πολυμερών.....	19
1.2.2 Ορισμός και βασικά χαρακτηριστικά.....	21
1.2.3 Κατηγοριοποίηση των πολυμερών	22
1.2.4 Εφαρμογές των πολυμερών	25
1.3 Ρητίνες.....	26
1.3.1 Η εποξειδική ρητίνη, το υλικό της μήτρας των δοκιμίων.....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΠΡΟΣΜΙΞΗΣ Al_2O_3 ΚΑΙ Fe_2O_3	
.....	29
2.1.1 Γενικά στοιχεία.....	29

2.1.2 Προέλευση και Παρασκευή	30
2.1.3 Κρυσταλλική δομή	33
2.2 Οξείδιο του σιδήρου.....	37
2.2.1 Γενικά στοιχεία	37
2.2.2 Το οξείδιο του σιδήρου Fe_2O_3	38
2.2.3 Εφαρμογές του οξειδίου του σιδήρου Fe_2O_3	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ	
ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ	41
3.1 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα.....	41
3.2 Διηλεκτρικά Μεγέθη.....	43
3.2.1 Διάκριση εννοιών διηλεκτρικού και μονωτικού υλικού	43
3.2.2 Σχετική μιγαδική επιτρεπτότητα.....	44
3.2.3 Εναλλακτική θεώρηση της μιγαδικής διηλεκτρικής σταθεράς.....	46
3.2.4 Εφαπτομένη απωλειών	47
3.3 Ιδιότητες ηλεκτρομονωτικών υλικών.....	49
3.3.1 Ειδική αγωγιμότητα όγκου (σ) και επιφάνειας (σ_s)	49
3.3.2 Απορρόφηση ενέργειας στα μονωτικά υλικά.....	50
3.3.3 Μηχανισμοί Πόλωσης.....	50
3.3.4 Επιθυμητές ιδιότητες μονωτικών υλικών.....	54
3.4 Διηλεκτρικές Μετρήσεις	55
3.4.1 Ισοδύναμα κυκλώματα (παράλληλο και σειριακό)	55
3.4.2 Διηλεκτρική φασματοσκοπία	56
3.4.3 Διηλεκτρικά υλικά low και high-k.....	57
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	58

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	58
4.1 Χρησιμοποιούμενα Υλικά.....	58
4.1.1 Οξείδιο του Αλουμινίου	59
4.2 Περιγραφή της διαδικασίας παρασκευής και των χρησιμοποιούμενων οργάνων	60
4.2.1 Η διαδικασία παρασκευής.....	60
4.2.2 Τα χρησιμοποιούμενα όργανα κατά την διαδικασία παρασκευής.....	64
4.3 Περιγραφή των χρησιμοποιούμενων οργάνων και της διαδικασίας μετρήσεων στις χαμηλές συχνότητες.....	65
4.3.1 Χρησιμοποιούμενα όργανα για τις μετρήσεις των χαμηλών συχνοτήτων.....	65
Η γέφυρα χαμηλών συχνοτήτων HP 4283A Precision LCR Meter	65
4.3.2 Η διαδικασία μετρήσεων στην γέφυρα χαμηλών συχνοτήτων	68
4.4 Περιγραφή των χρησιμοποιούμενων οργάνων και της διαδικασίας μετρήσεων στις υψηλές συχνότητες	71
4.4.1 Χρησιμοποιούμενα όργανα για τις μετρήσεις των υψηλών συχνοτήτων	71
4.4.2 Η διαδικασία μετρήσεων στην γέφυρα υψηλών συχνοτήτων	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΡΗΜΑΤΩΝ	73
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	107
Βιβλιογραφία	111

Λίστα Πινάκων

<i>Πίνακας 1: Μηχανικές ιδιότητες μεταλλικών, κεραμικών και πολυμερικών μήτρων [2,6-8]</i>	17
<i>Πίνακας 2: Μηχανικές ιδιότητες διαφόρων τύπων ινών που χρησιμοποιούνται ως πληρωτικά πολυμερικών μήτρων [2,6-8]</i>	18
<i>Πίνακας 3: Εφαρμογές Πολυμερών</i>	26
<i>Πίνακας 4: Ορυκτολογική σύσταση του βωξίτη [17]</i>	30
<i>Πίνακας 5: Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων των τριών κυριότερων οξειδίων του σιδήρου [19]</i>	38
<i>Πίνακας 6: Τιμές πραγματικής συνιστώσας σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς σε σχέση με τα διάφορα υλικά</i>	45
<i>Πίνακας 7: Τεχνικά χαρακτηριστικά εποξειδικής ρητίνης Eroxol 2847</i>	59
<i>Πίνακας 8: Τεχνικά χαρακτηριστικά χρησιμοποιούμενης πούδρας αλουμίνας</i>	60

Λίστα Σχημάτων

<i>Σχήμα 1: Ιστορική εξέλιξη των υλικών [12]</i>	20
<i>Σχήμα 2: Επεξήγηση της δημιουργίας του πολυμερούς [13, τροποποιημένο]</i>	21
<i>Σχήμα 3: Κατηγοριοποίηση πολυμερών ανά διαφορετικά κριτήρια</i>	24
<i>Σχήμα 4: Χαρακτηριστική ομάδα εποξειδίων</i>	27
<i>Σχήμα 5: Χημικός τύπος εποξειδικής ρητίνης [16]</i>	27
<i>Σχήμα 6: Διδραστικό μόριο και εκκινητής (διαμίνη)[16]</i>	27
<i>Σχήμα 7: Χημική αναπαράσταση της αντίδρασης διαμίνης με τους οξιρανικούς δακτυλίους μακρομορίων [16]</i>	28
<i>Σχήμα 8: Συνοπτικό διάγραμμα της διαδικασίας Bayer[28]</i>	32
<i>Σχήμα 9: Κρυσταλλική δομή αλουμίνας [18]</i>	33
<i>Σχήμα 10: Κατηγοριοποίηση υλικών με βάση την ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα [25]</i>	42
<i>Σχήμα 11: Παράλληλο ισοδύναμο κύκλωμα χωρητικότητας-αγωγιμότητας (C - G) [26]</i>	46
<i>Σχήμα 12: Διανυσματικό διάγραμμα της μιγαδικής επιτρεπτότητας λαμβάνοντας υπόψη το διάνυσμα σφάλματος ϵ_{error}. Ο δείκτης m δηλώνει τις μετρούμενες τιμές</i>	48
<i>Σχήμα 13: Μηχανισμός ηλεκτρονικής πόλωσης [27]</i>	51

Σχήμα 14: Μηχανισμός ηλεκτρονικής πόλωσης [27]	51
Σχήμα 15: Μηχανισμός διπολικής πόλωσης [27]	52
Σχήμα 16: Σχηματική συνοπτική περιγραφή ειδών πόλωσης [18,19]	52
Σχήμα 17: Εξάρτηση της πόλωσης από τη θερμοκρασία [2,31]	53
Σχήμα 18: Εξάρτηση της πόλωσης από τη συχνότητα [2,31]	53
Σχήμα 19: Διανυσματικά διαγράμματα ρευμάτων και τάσεων ισοδύναμων κυκλωμάτων με πυκνωτή παράλληλων πλακών	55
Σχήμα 20: Περιγραφή διάταξης λειτουργίας κελιού διηλεκτρικού μετρήσεων	67
Σχήμα 21: Κελί διηλεκτρικών μετρήσεων HP 1641B Dielectric Test Fixture	67
Σχήμα 22: Δημιουργούμενο ηλεκτρικό πεδίο μέσω του κελιού διηλεκτρικών μετρήσεων	68
Σχήμα 23: Σχηματική αναγωγή του κελιού μέτρησης στο μέγεθος του δισκίου	70

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1: Βωζίτης [17]	31
Εικόνα 2: Αιματίτης ποικιλίας “Υαλοκέφαλος” (Περιοχή προέλευσης Λαύριο) [20]	39
Εικόνα 3: Φυσική μορφή και κρυσταλλική δομή μαγνητίτη [21,22]	40
Εικόνα 1: Ο Ζυγός ακριβείας Ohaus Galaxy 110.....	64
Εικόνα 2: Λουτρό υπερήχων Elma Transsonic T460.....	65
Εικόνα 3: Η γέφυρα χαμηλών συχνοτήτων HP 4283A Precision	66
Εικόνα 4: Η χρησιμοποιούμενη διάταξη (υπολογιστής – γέφυρα) για τη διαδικασία των μετρήσεων.....	68
Εικόνα 5: Η γέφυρα υψηλών συχνοτήτων Agilent 4287ARF Meter	71
Εικόνα 6: Το κελί διηλεκτρικών μετρήσεων Agilent 16453A	72
Εικόνα 7: Απεικόνιση της επιφάνειας του δίσκου 1(αριστερά) και του δίσκου 4(δεξιά) για συγκέντρωση 0,1% σε Al_2O_3 , στο μικροσκόπιο	74
Εικόνα 8: Δίσκος 1(αριστερά) και δίσκος 4(δεξιά)για συγκέντρωση 5% σε Al_2O_3	75
Εικόνα 9: Απεικόνιση της επιφάνειας του δίσκου 1(αριστερά) και του δίσκου 4(δεξιά)για συγκέντρωση 0,1% σε Fe_2O_3 , στο μικροσκόπιο	75
Εικόνα 10: Δίσκος 1(αριστερά) και δίσκος 4(δεξιά)για συγκέντρωση 5% σε Fe_2O_3	75

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ, ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΚΑΙ ΡΗΤΙΝΕΣ

1.1 Σύνθετα υλικά

1.1.1 Παραγωγή σύνθετων υλικών

Η διαδικασία παραγωγής σύνθετων υλικών, προέκυψε από την ανάγκη για υλικά με βελτιωμένη απόδοση και συγκεκριμένες ιδιότητες, όπως το μικρότερο βάρος, την μεγαλύτερη αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις και υψηλότερες θερμοκρασίες, το χαμηλότερο κόστος, το χαμηλότερο ενεργειακό αποτύπωμα και την φιλική προς το περιβάλλον συμπεριφορά. Τα σύνθετα υλικά αποτελούν προϊόντα της φυσικής ανάμιξης, με ελεγχόμενο τρόπο και με καθορισμένες αναλογίες δύο ή περισσοτέρων υλικών (μήτρας και εγκλείσματος), σε μακροσκοπική κλίμακα.

Έτσι ένα υλικό χαρακτηρίζεται ως σύνθετο, εφόσον αποτελείται από δύο ή περισσότερες φυσικά ή/ και χημικά ευδιάκριτες υλικά (φάσεις), οι οποίες διαχωρίζονται μεταξύ τους μέσω μιας διεπιφάνειας, με το σύνθετο υλικό να παρουσιάζει τελικά διαφορετικές ιδιότητες από τα επιμέρους. Στην παραγωγή ενός σύνθετου υλικού, το κύριο υλικό της σύνθεσης ονομάζεται μαζική φάση, γνωστή και ως **μήτρα** και είναι το υλικό με το μεγαλύτερο κατά όγκο ποσοστό, στο σύνθετο σύστημα. Ο ρόλος της μήτρας είναι να προστατεύει τα εγκλείσματα (υλικά πρόσμιξης) από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και είναι αυτή που καθορίζει την αντίσταση του σύνθετου υλικού στις εξωτερικές συνθήκες. Τα εγκλείσματα αποτελούν την διάσπαρτη (μη συνεχή) φάση αποκαλούμενη και ως **ενίσχυση**.

Η πρόσφυση των εγκλεισμάτων στη μήτρα γίνεται με διάφορους μηχανισμούς, όπως για παράδειγμα είναι η ενδοδιάχυση (κατά την οποία σχηματίζεται δεσμός μεταξύ δύο πολυμερικών επιφανειών από το μοριακό δίκτυο της μιας επιφάνειας σε αυτό της άλλης) η ηλεκτροστατική έλξη, καθώς και διάφοροι άλλοι τύποι χημικών

αλληλεπιδράσεων. Το ζητούμενο είναι η καλύτερη δυνατή συνεργασία μήτρας-εγκλείσματος.

Συνοψίζοντας λοιπόν, οι βασικές αρχές που διέπουν τα σύνθετα υλικά έχουν ως εξής [1]:

- Αποτελούνται από δύο ή περισσότερα υλικά με διαφορετικές φυσικές ιδιότητες, τα οποία μπορούν να διαχωριστούν με χρήση μηχανικών μεθόδων.
- Παράγονται με ανάμειξη των επιμέρους υλικών και ελεγχόμενη διασπορά του ενός στο εσωτερικό του άλλου.
- Συνήθως δεν διαλύονται το ένα στο άλλο και είναι δυνατόν να εντοπιστεί η διεπιφάνεια μεταξύ των συστατικών τους.
- Αποκτούν νέες ιδιότητες, βελτιωμένες, συγκρινόμενες με εκείνες των συστατικών τους [2].
- Ζητούμενο αποτελεί η καλύτερη δυνατή συνεργασία μήτρας-εγκλείσματος.

1.1.2 Κατηγοριοποίηση σύνθετων υλικών

Η κατηγοριοποίηση των σύνθετων υλικών μπορεί να γίνει με διάφορα κριτήρια, όπως το υλικό της μήτρας (μαζικής φάσης), τη γεωμετρία της φάσης ενίσχυσης (ίνες, κόκκοι κτλ.), τον προσανατολισμό των σωματιδίων ενίσχυσης, τα επίπεδα (στρώσεις) ενίσχυσης αλλά και την τάξη μεγέθους της φάσης ενίσχυσης. Στην τελευταία περίπτωση, ο διαχωρισμός αφορά τα **μικρο-σύνθετα** (όταν το μέγεθος της φάσης ενίσχυσης είναι της τάξης του μικρομέτρου) και τα **νανο-σύνθετα** (όταν το μέγεθος της φάσης ενίσχυσης είναι της τάξης του νανομέτρου). Ειδικά στην περίπτωση των νανοσύνθετων πολυμερών θα πρέπει να σημειωθεί ότι είναι ευρεία η εφαρμογή τους στους τομείς των πλαστικών, των δομικών υλικών, των ιατρικών προϊόντων και των ηλεκτρονικών συσκευών [3-5].

Με βάση τη μήτρα τα σύνθετα υλικά διακρίνονται σε:

- **σύνθετα μεταλλικής μήτρας** (η μήτρα αποτελείται από μέταλλα ισοτροπικά, συνήθως ελατά, όπως το μαγνήσιο, το αλουμίνιο και το τιτάνιο). Παρουσιάζουν καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, μηδενική απορρόφηση υγρασίας, αντοχή σε κρούσεις και μεγάλη θερμοκρασιακή αντοχή, ενώ από τα βασικότερα μειονεκτήματά τους είναι το μεγάλο βάρος τους, το υψηλό κόστος τους και η πολυπλοκότητα της κατασκευής τους.

- **σύνθετα κεραμικής μήτρας** (η μήτρα αποτελείται από ανόργανες στερεές, χημικές ενώσεις μετάλλων και αμέταλλων στοιχείων που έχει υποστεί κατεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες (ψήσιμο) όπως τα SiC, Si₃N₄, Al₂O₃, ZrO₂ και τα κεραμικά γυαλιά). Παρουσιάζουν χαμηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, εξαιρετική αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες, είναι σκληρά, ταυτόχρονα όμως εύθραυστα και μη εύπλαστα υλικά, ενώ παρουσιάζουν μικρή αντοχή στον εφελκυσμό.
- **σύνθετα πολυμερικής μήτρας** (χρησιμοποιούνται θερμοπλαστικές ή θερμοσκληρυνόμενες πολυμερικές μήτρες, με τα πολυμερή να αναλύονται περαιτέρω στη συνέχεια μιας και αποτελούν την μήτρα του σύνθετου υλικού που θα παρασκευάσουμε για το πειραματικό στάδιο)

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μηχανικές ιδιότητες των προαναφερόμενων μήτρων.

Είδος Μήτρας	Πυκνότητα (Kg/m ³)	Μέτρο ελαστικότητας Young (GPa)	Εφελκυστική αντοχή (GPa)
Πολυεστέρες	1.2-1.5	2-4	0.04-0.1
Εποξειδικές ρητίνες	1.1-1.4	3-6	0.035-0.1
Νάυλον 6.6	1.14	1.4-1.8	0.06-0.07
Πολυπροπυλένιο	0.9	1.0-1.4	0.02-0.04
Αλουμίνα (Al ₂ O ₃)	3.9	320-380	0.28-0.55
Αργίλιο (Al)	2.7	69	0.09
Χαλκός (Cu)	8.9	110	0.2
PSZ (partially stabilized Zn)	6.0	200	0.07

Πίνακας 1: Μηχανικές ιδιότητες μεταλλικών, κεραμικών και πολυμερικών μήτρων [2,6-8]

Με βάση το έγκλεισμα τα σύνθετα υλικά διακρίνονται σε:

- **σύνθετα υλικά με εγκλείσματα υπό μορφή κόκκων** (τα προσθετικά υλικά αποτελούνται από κόκκους ενός ή περισσοτέρων υλικών σε διάφορες μήτρες). Στην περίπτωση ανόργανων πληρωτικών υπό μορφή κόκκων υφίστανται επιθυμητές

ιδιότητες όπως χαμηλό κόστος και αύξηση της αντοχής σε κρούσεις, με ταυτόχρονη όμως μείωση της αντοχής στη θερμοκρασία, αντίθετα με τα οργανικά πληρωτικά.

- **σύνθετα υλικά με εγκλείσματα υπό μορφή ινών** (συνήθως χρησιμοποιούνται τέτοιου είδους πληρωτικά στην περίπτωση των πολυμερικών μητρών, με τις ανόργανες ίνες (γυαλιού, μετάλλου κ.α.) να είναι θερμοανθεκτικές, άκαμπτες και να παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις, καλές ηλεκτρικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα σε χημικές προσβολές. Στην περίπτωση των οργανικών ινών (αραμιδικές ίνες, ίνες άνθρακα, κυτταρινικές ίνες κ.α.) επιτυγχάνεται χαμηλό βάρος, υψηλό μέτρο ελαστικότητας και μεγάλη θερμοκρασιακή αντοχή.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται χαρακτηριστικές μηχανικές ιδιότητες διαφόρων τύπων ινών που χρησιμοποιούνται ως πληρωτικά πολυμερικών μήτρων

Ίνες	Πυκνότητα (Kg/m ³)	Μέτρο ελαστικότητας Young (GPa)	Εφελκυστική αντοχή (GPa)
Kevlar 49	1.48	70	3.0
HM Carbon (I)	1.95	400	2.4
E- glass	2.56	76	1.4-2.5
Nimonic 90	8.18	204	1.2

Πίνακας 2: Μηχανικές ιδιότητες διαφόρων τύπων ινών που χρησιμοποιούνται ως πληρωτικά πολυμερικών μήτρων [2,6-8]

Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί και η κατηγορία των **πολυστρωματικών σύνθετων**, στην οποία η μήτρα και το εγκλείσμα έχουν τη μορφή φύλλων ή στρωμάτων, με το συνδυασμό αυτό να προσδίδει στο σύνθετο διάφορα πλεονεκτήματα όπως αντοχή, ακαμψία, ελαφρότερη κατασκευή, θερμική και ακουστική μόνωση κ.α..

Με βάση την ομοιογένεια τα σύνθετα υλικά σε **ομοιογενή** και **ανομοιογενή** σύνθετα. Στην πρώτη κατηγορία η ενισχυτική φάση είναι ισομερώς κατανομημένη στο εσωτερικό και τα δομικά στοιχεία παρουσιάζουν κανονική και επαναλαμβανόμενη μορφή, αντίθετα με ανομοιογενή σύνθετα που ακολουθούν τυχαίες κατανομές.

1.2 Πολυμερή

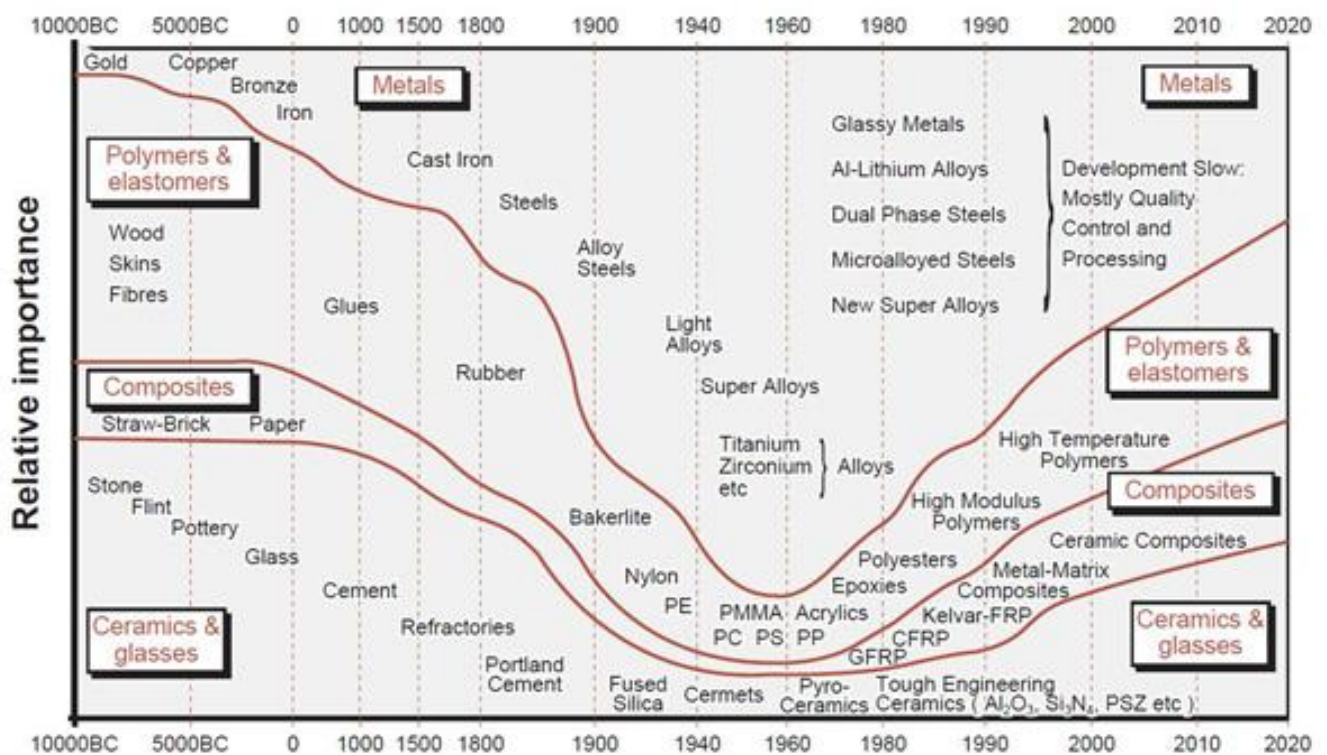
1.2.1 Ιστορική αναδρομή των πολυμερών

Οι όροι πολυμερή, πλαστικά και ρητίνες θεωρούνται συνώνυμοι ωστόσο υπάρχουν διαφορές. Πολυμερές είναι ένα υλικό που είναι καθαρό χωρίς προσμίξεις και του οποίου τα μόρια αποτελούνται από μικρά επαναλαμβανόμενα τμήματα, τα μονομερή, και ενώνονται μεταξύ τους σε μεγάλες πολυμερικές αλυσίδες. Αν τώρα στα πολυμερή προστεθούν και άλλα υλικά τότε χρησιμοποιείται για το σύνθετο υλικό ο όρος **ρητίνη ή πλαστικό**. Πολυμερικά θεωρούνται και τα υλικά όπως το ξύλο, το βαμβάκι, το μέταλλο, το μετάξι, οι ίνες των οργανισμών, τα οστά, το DNA των κυττάρων. Η αυξημένη κατανάλωση όμως των πλαστικών σε σχέση με τα φυσικά πολυμερή δικαιολογείται από τα πλεονεκτήματα που εμφανίζουν τα πλαστικά σε σχέση με τα άλλα υλικά, όπως η εύκολη μορφοποίηση τους στο επιθυμητό σχήμα, η θερμική και ηλεκτρική τους μόνωση κ.α.

Η χρήση των πολυμερών εμφανίζεται από την αρχή της ανθρώπινης ιστορικής εξέλιξης, με διάφορα πολυμερή (ξύλο, μαλλί, βαμβάκι, δέρμα, καουτσούκ) να εμφανίζονται κατά καιρούς και ιδιαίτερα νωρίς όσον αφορά στην εξέλιξη της ανθρώπινης δραστηριότητας. Τα σημεία – σταθμοί αυτής της ιστορικής εξέλιξης καταγράφονται στη συνέχεια, με βασική μεταβατική περίοδο αυτήν κατά την οποία παρατηρείται η πρώτη «στροφή» από τα φυσικά στα συνθετικά πολυμερή.

- 19ος αιώνας: Έναρξη της διαδικασίας παραγωγής ημι-συνθετικών πολυμερών, δηλαδή φυσικών πολυμερών που επεξεργάζονται χημικά ώστε να προκύψουν υλικά με βελτιωμένες ιδιότητες.
- 1839: Μετατροπή του καουτσούκ σε ελαστικό καλύτερων ιδιοτήτων με την προσθήκη θείου από τον Charles Goodyear (διαδικασία γνωστή ως βουλκανισμός).
- 1869: Εφεύρεση του πρώτου συνθετικού πολυμερικού υλικού με χρήση νιτρικής κυτταρίνης και καμφοράς από τον John Wesley Hyatt. Προέκυψε έτσι το κυτταρινοειδές (celluloid), το οποίο αργότερα οδήγησε στις ίνες rayon.
- 1870: Παρασκευή του πρώτου πλαστικού από συνθετική κυτταρίνη (celluloid). Το νέο υλικό χρησιμοποιείται ευρέως σε φιλμς, κτένες κτλ.

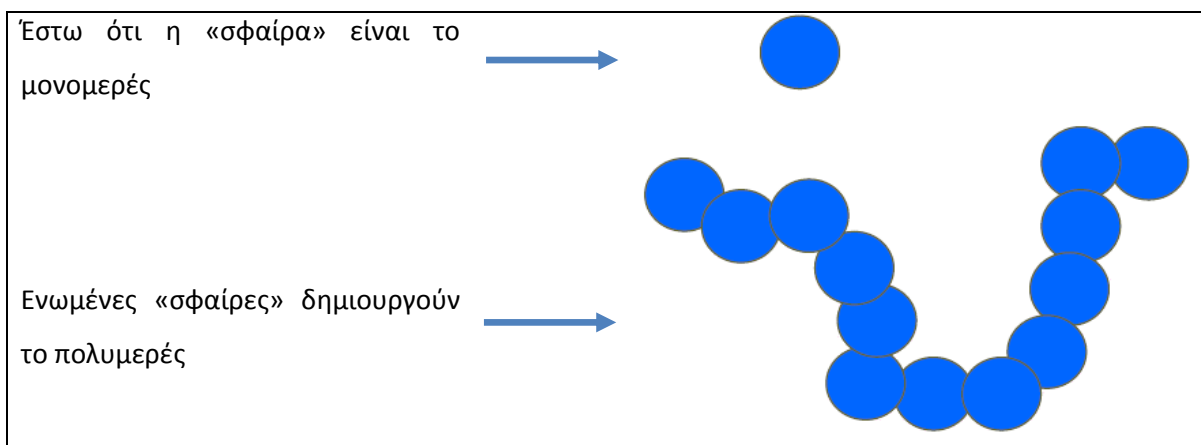
- 1909: Εμφάνιση του "βακελίτη" από τον Leo Bakeland, ένα υλικό που αρχικά χρησιμοποιήθηκε ευρέως στα μαύρα τηλέφωνα.
- 1920: Εισαγωγή της έννοιας του μακρομορίου από το χημικό Hermann Staudinger (με την αναγνώριση της σημασίας της να έρχεται το 1953 με τη βράβειυσή του με Nobel το 1953).
- 1945: Με τη λήξη του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου εμφανίζεται η ανάγκη αυξημένης παραγωγής συνθετικών πολυμερών εξαιτίας της αυξημένης ζήτησης και της ανεπάρκειας των φυσικών πολυμερών. Ο τομέας γνωρίζει ραγδαία ανάπτυξη, ιδιαίτερα με την ανάπτυξη θερμοπλαστικών πολυμερών (όπως το πολυστυρένιο (PS), το πολυαιθυλένιο (PE), το πολυπροπυλένιο (PP) και το χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC)) [9-11].



Σχήμα 1: Ιστορική εξέλιξη των υλικών [12]

1.2.2 Ορισμός και βασικά χαρακτηριστικά

Ορίζοντας την έννοια των πολυμερών θα μπορούσε να αναφερθεί πως τα **πολυμερή** είναι χημικές ουσίες που τα μόρια τους σχηματίζουν μακρές αλυσίδες, οι οποίες αποτελούνται από επαναλαμβανόμενα τμήματα, τα μονομερή (ή αλλιώς δομική μονάδα, γνωστή ως *mer*) [4]. Η ένωση που προκύπτει κάθε φορά ως συνένωση δύο ή περισσότερων μορίων έχει ίδια ποσοτική και ποιοτική σύσταση με εκείνη από την οποία προέρχονται τα προς ένωση μόρια (μονομερές), με πολλαπλάσιο μοριακό βάρος (ενδεικτικό είναι το ακόλουθο διάγραμμα). Ένα βασικό μέγεθος το οποίο καθορίζει τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του πολυμερούς, είναι το μέγεθος του μορίου. Η βάση των πολυμερών είναι οργανική, βασίζεται δηλαδή σε αλυσίδα ατόμων άνθρακα, τα οποία ενώνονται μέσω ομοιοπολικών κατά κύριο λόγο δεσμών [5].



Σχήμα 2: Επεξήγηση της δημιουργίας του πολυμερούς [13, τροποποιημένο]

Η βασική χρησιμότητα της αντίδρασης δημιουργίας των πολυμερών (γνωστής ως αντίδραση πολυμερισμού) είναι το γεγονός, ότι προσδίδει σημαντικές ιδιότητες – πλεονεκτήματα στην τελική κάθε φορά ένωση. Ανάμεσα σε αυτές τις ιδιότητες μπορούν να εντοπιστούν οι εξής:

- ✓ Έχουν χαμηλό ειδικό βάρος εξαιτίας της μικρής τους πυκνότητας.

- ✓ Επειδή είναι ελαφριά, μπορούν να εξυπηρετήσουν τις απαιτήσεις μικρού βάρους – φορητότητας σε διάφορες εφαρμογές.
- ✓ Έχουν χαμηλό κόστος.
- ✓ Παρουσιάζουν ιδιαίτερη αντοχή, ανθεκτικότητα και αντίσταση στη διάβρωση.
- ✓ Διευκολύνουν κατά πολύ την κατεργασία και τη μορφοποίησή τους, με αποτέλεσμα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές αυξημένης πολυπλοκότητας.
- ✓ Μπορούν να αποκτήσουν ιδιαίτερες ιδιότητες ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή, όπως η ευκαμψία και η διαφάνεια.
- ✓ Παρουσιάζουν ιδιότητες θερμικής και ηλεκτρικής μόνωσης (με τη δεύτερη κατηγορία να αποτελεί και το αντικείμενο διερεύνησης στην παρούσα εργασία).

Εντούτοις, τα πολυμερή παρουσιάζουν και συγκεκριμένα μειονεκτήματα, όπως η συμβολή τους στην περιβαλλοντική ρύπανση, το ότι είναι ιδιαίτερα εύφλεκτα και ότι τήκονται εύκολα (χαρακτηρίζονται από χαμηλό σημείο τήξεως), τα οποία δεν περιορίζουν αισθητά την αυξημένη χρησιμότητα και το ευρύ πεδίο εφαρμογών τους [11,13].

1.2.3 Κατηγοριοποίηση των πολυμερών

Η κατηγοριοποίηση των πολυμερών ποικίλει ανάλογα με το κριτήριο που χρησιμοποιείται κάθε φορά. Έτσι, ανάλογα με το μηχανισμό της αντίδρασης που πραγματοποιείται κάθε φορά ο πολυμερισμός διακρίνεται σε **αλυσωτό** (με την ένωση των ίδιων μονομερών ενώσεων) και σε **σταδιακό** (με την ένωση και διαφορετικών πολυμερών) ο οποίος με τη σειρά του διακρίνεται σε εκείνον που υλοποιείται με αντιδράσεις **πολυπροσθήκης** και σε εκείνον που υλοποιείται με αντιδράσεις **πολυσυμπύκνωσης**. Οι αντιδράσεις πολυπροσθήκης υλοποιούνται σε τρεις διακριτές φάσεις. Αυτήν της έναρξης, κατά την οποία ο διπλός δεσμός μετατρέπεται σε απλό μέσω μιας ουσίας που ονομάζεται ενεργοποιητής, της διάδοσης, κατά την οποία η μακρομοριακή αλυσίδα σχηματίζεται και αναπτύσσεται και του τερματισμού της αντίδρασης. Οι αντιδράσεις πολυσυμπύκνωσης υλοποιούνται μέσω πολλαπλών ανεξαρτήτων αντιδράσεων ζευγών μονομερών με παραπροϊόντα των αντιδράσεων νερό ή αμμωνία.

Ανάλογα με τη φυσική συμπεριφορά των πολυμερών κατά τη επεξεργασία τους, τα πολυμερή διακρίνονται σε

- **θερμοπλαστικά**, τα οποία αποκτούν πλαστικότητα και μορφοποιούνται με την επίδραση της θερμοκρασίας και της πίεσεως,
- **θερμοσκληρυνόμενα**, τα οποία με την επίδραση της θερμότητας αποκτούν διασταυρούμενες ενώσεις προς σχηματισμό πλέγματος ενισχύοντας έτσι τη σκληρότητά τους χωρίς όμως πλαστικότητα και
- **ελαστομερή**, τα οποία διατηρούν τη σκληρότητά τους με ταυτόχρονη όμως διατήρηση της ελαστικότητας εξαιτίας της απουσίας πλέγματος.

Σε αυτή την ομάδα κατηγοριών εντάσσεται και αυτή των πρόσθετων, τα οποία προέρχονται από την ανάμιξη πολυμερών με διάφορες ουσίες προκειμένου να διαμορφωθούν - ενισχυθούν συγκεκριμένες ιδιότητες. Στην κατηγορία των πρόσθετων ανήκουν πλαστικοποιητές, πρόσθετα ενίσχυσης, σταθεροποιητές, αντιπυρρικά πρόσθετα και χρωστικές.

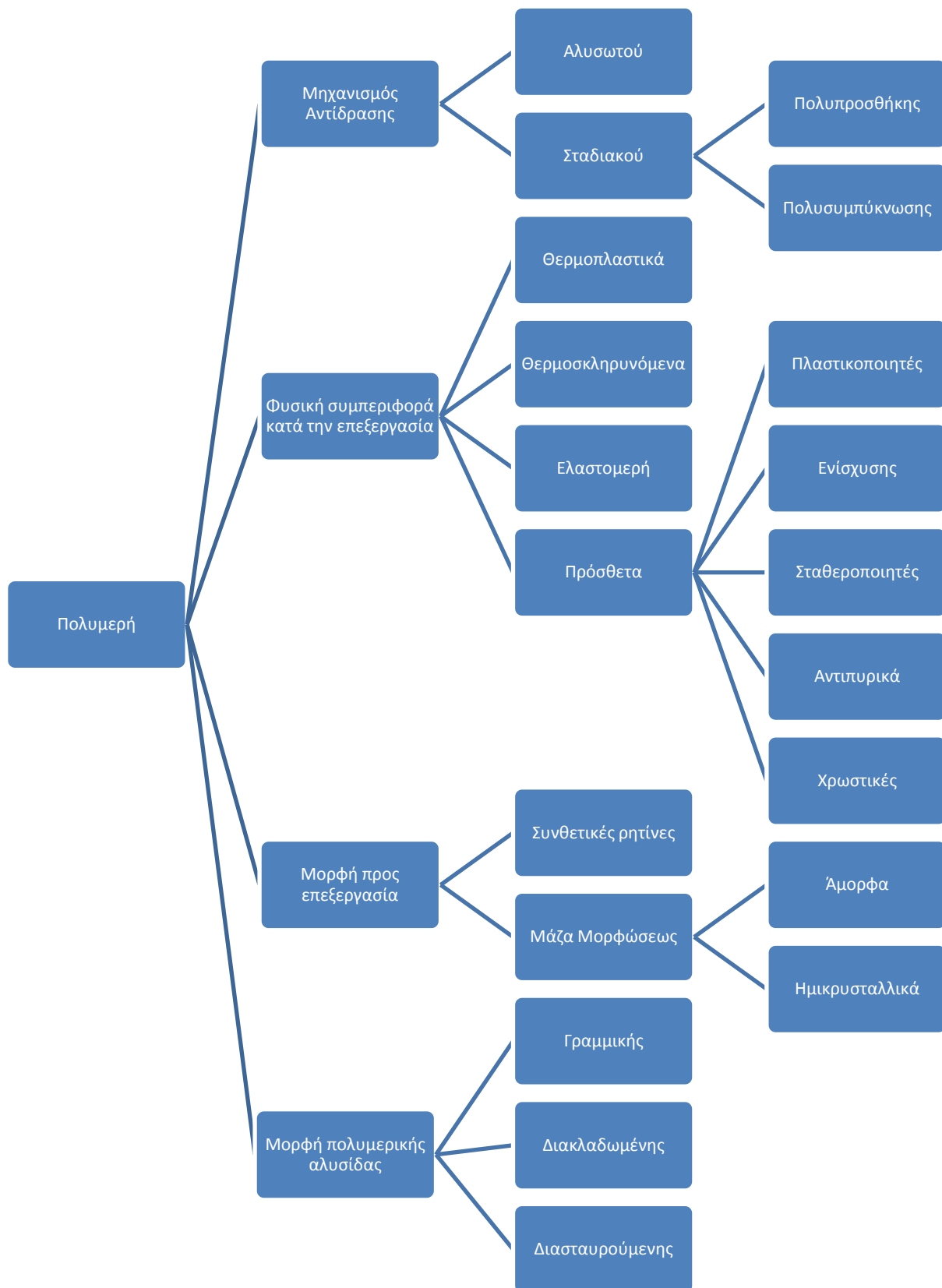
Τα θερμοπλαστικά πολυμερή, μαλακώνουν κατά τη θέρμανση, ενώ κατά την ψύξη σκληραίνουν, ιδιότητες που αποδίδονται στην ευχέρεια ολίσθησης των μακρομορίων. Αυτό είναι αποτέλεσμα της δημιουργίας ισχυρών δεσμών διασταύρωσης μεταξύ των μακρομορίων και της δημιουργίας δικτύου που καθιστά δύσκολη τη μετακίνησή τους. Τα θερμοσκληρυνόμενα παρουσιάζουν ακριβώς τις αντίθετες ιδιότητες με τα θερμοπλαστικά. Τα ελαστομερή υλικά χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή (με χαρακτηριστικά προϊόντα τα ελαστικά των αυτοκινήτων) και σημαντική παράμετρος της διαδικασίας παραγωγής, είναι η προσθήκη θείου κατά τη θέρμανση, με την ποσότητα του θείου να είναι ανάλογη με τη σκληρότητά του και αντιστρόφως ανάλογη με την ελαστικότητά του.

Ανάλογα με τη μορφή που έχουν τα προς επεξεργασία πολυμερή διακρίνονται

- σε **συνθετικές ρητίνες** (υγρή ή τηκόμενη στερεή μορφή)
- και σε **μάζα μορφώσεως** (στερεή μορφή), τα οποία διακρίνονται περαιτέρω σε άμορφα ή ημικρυσταλλικά [14,15].

Τέλος, ανάλογα με τη μορφή της πολυμερικής αλυσίδας, τα πολυμερή διακρίνονται σε γραμμικής, διακλαδωμένης και διασταυρούμενης αλυσίδας [11].

Το σύνολο των προαναφερόμενων κατηγοριών και τα κριτήρια διαχωρισμού τους καταγράφονται στο ακόλουθο διάγραμμα



Σχήμα 3: Κατηγοριοποίηση πολυμερών ανά διαφορετικά κριτήρια

1.2.4 Εφαρμογές των πολυμερών

Στον πίνακα που ακολουθεί καταγράφονται οι διάφορες εφαρμογές συγκεκριμένων πολυμερών ανάλογα με την κατηγοριοποίησή τους με βάση τη φυσική συμπεριφορά των πολυμερών κατά τη επεξεργασία τους,

<i>Πολυμερές</i>	<i>Πεδία εφαρμογής</i>
Θερμοπλαστικά	
Πολυαιθυλένιο (PE)	Υλικά συσκευασίας, φύλλα, μπουκάλια, κιβώτια, δοχεία, σαν μονωτικό για σύρματα και καλώδια, για οικιακά είδη, σακούλες ρούχων, φιλμ
Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC)	Δάπεδα, μεμβράνες σωλήνες εύκαμπτα φύλλα, ταπετσαρίες,
Πολυπροπυλένιο (PP)	Φύλλα, σωλήνες, καλύμματα, κατασκευή εξαρτημάτων αυτοκινήτων, οικιακά είδη, ίνες, αποσκευές
Πολυστυρένιο (PS)	Δοχεία, αφρώδη υλικά σε συσκευασίες, κιβώτια, σε συνδυασμό με καουτσούκ για είδη σπορ, έπιπλα για ράδιο και TV, εξαρτήματα αυτοκινήτων, κλπ.
Θερμοπλαστικός πολυεστέρας (PET, Dacron, Mylar)	Μαγνητικές ταινίες, ίνες, μεμβράνες, φιλμ, δοχεία, ίνες
Ακρυλικά (PMMA, Lucite)	Παράθυρα, φακοί επαφής
Nylon	Ρουχισμός, σχοινιά, γρανάζια, εμπορικές πλαστικές και συνθετικές ίνες
Πολυανθρακίτης (PC)	Δίσκοι Compact (CD), οπτικές ίνες
Ακρυλονιτρίλιο-Βουταδιένιο-Στυρένιο (ABS)	Βαλίτσες, τηλεφωνικές συσκευές
Πολυτετραφθοροαιθυλένιο (Teflon)	Υλικά στεγανοποίησης, έδρανα, φλάντζες
Θερμοσκληρυνόμενα	
Πολυουρεθάνη	Φύλλα, σωλήνες, αφρώδη υλικά, ίνες
Φαινολικά (π.χ. βακελίτης)	Ηλεκτρολογικός / ηλεκτρονικός εξοπλισμός

Ρητίνη ουρίας-φορμαλδεΰδης	Πιάτα, ελάσματα
Θερμοσκληρυνόμενοι πολυεστέρες	Σύνθετα υλικά με ίνες γυαλιού (fiberglass), επικαλύψεις
Ρητίνες	Κόλλες (π.χ. Araldite), σύνθετα υλικά με ίνες γυαλιού (fiberglass), επικαλύψεις
Ελαστομερή	
Πολυβουταδιένιο	Ελαστικά αυτοκινήτων
Πολυισοπρένιο	Ελαστικά αυτοκινήτων, έδρανα, φλάντζες
Πολυχλωροπρένιο	Έδρανα, πυράντοχα αφρώδη υλικά, μεταφορικές ταινίες
Σιλικόνη	Κόλλες, φλάντζες

Πίνακας 3: Εφαρμογές Πολυμερών

1.3 Ρητίνες

Οι συνθετικές ρητίνες ανήκουν στα πολυμερή υλικά. Προκύπτουν μετά από την σύνθεση και την κατάλληλη επεξεργασία υλικών χαμηλού μοριακού βάρους ή πρώτων υλών από μακρομοριακές ενώσεις οι οποίες βρίσκονται σε υγρή κατάσταση ή είναι διαλύτες ή τηκόμενα στερεά, έτσι ώστε να λάβουν την απαιτούμενη αντοχή για τις συγκεκριμένες εφαρμογές. Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες :

- Βασικές Ύλες για επιχρίσματα, βερνίκια, και κόλλες, ως διαλύματα και γαλακτώματα.
- Τεχνητές Ρητίνες ως συνδετικά μέσα για ξύλινα αντικείμενα, δέρματα, τεχνητό λίθο κ.α.. Οι τεχνητές ρητίνες αποτελούνται από μία μεγάλη συλλογή πολυμερών, όπως είναι οι σκληρυνόμενες τεχνητές ρητίνες (θερμοσκληρυνόμενες, μονομερείς ρητίνες χυτεύσεως) ή οι ρητίνες για μέσα διαποτίσεως, κόλλες, βερνίκια κ.α.

1.3.1 Η εποξειδική ρητίνη, το υλικό της μήτρας των δοκιμίων

Οι εποξειδικές ρητίνες ανήκουν στην κατηγορία των θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών. Έγιναν εμπορικά διαθέσιμες κατά το 1950 [16] και λόγω των ιδιοτήτων τους

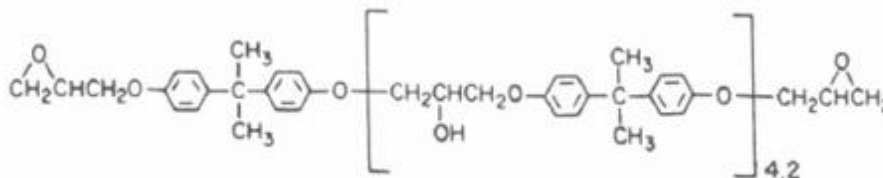
βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στη βιομηχανία. Μια από τις διαδεδομένες χρήσεις τους, είναι ως μήτρες στα σύνθετα υλικά γιατί προσφέρουν υψηλή απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες και διαβρωτικά περιβάλλοντα.

Οι εποξειδικές ρητίνες αποτελούνται από αλυσίδες που έχουν τουλάχιστον δύο εποξυομάδες



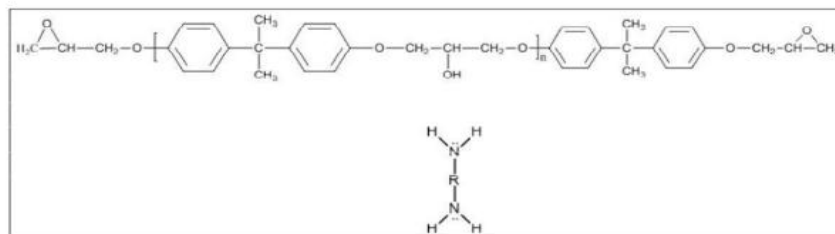
Σχήμα 4: Χαρακτηριστική ομάδα εποξειδίων

Ανάλογα με τον αριθμό των δακτυλίων (εποξυ-ομάδων) που βρίσκονται παρόντες στο μόριο, διακρίνονται σε διδραστικές (δύο οξιρανικοί δακτύλιοι) ή πολυδραστικές (τρεις ή περισσότεροι δακτύλιοι). Ο χημικός τύπος της εποξειδικής ρητίνης παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.

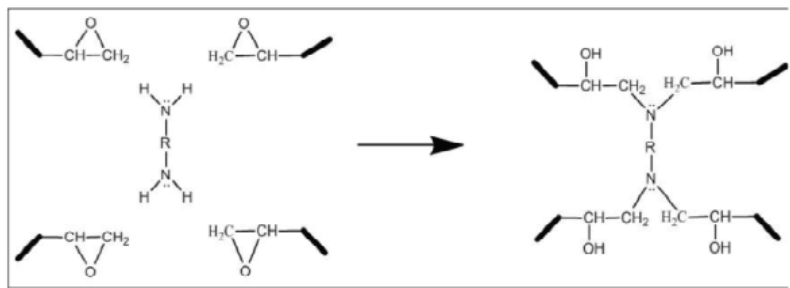


Σχήμα 5: Χημικός τύπος εποξειδικής ρητίνης [16]

Ο οξιρανικός δακτύλιος είναι αυτός που αντιδρά με ένα ευρύ φάσμα άλλων οργανικών ενώσεων. Για να ενωθούν δυο μόρια στα άκρα των οποίων υπάρχει η συγκεκριμένη ομάδα, απαιτείται ένα τρίτο μόριο που ουσιαστικά χρησιμοποιείται ως συνδετικός κρίκος ώστε να ξεκινήσει η αντίδραση που θα οδηγήσει στον σχηματισμό ενός τρισδιάστατου δικτύου. Το τρίτο αυτό μόριο ονομάζεται **σκληρυντής** και συνήθως είναι κάποια αμίνη ή διδραστικός ανυδρίτης.



Σχήμα 6: Διδραστικό μόριο και εκκινητής (διαμίνη)[16]



Σχήμα 7: Χημική αναπαράσταση της αντίδρασης διαμίνης με τους οξιρανικούς δακτυλίους μακρομορίων [16]

Οι εποξειδικές ρητίνες μπορούν να πολυμερισθούν από ένα ευρύ φάσμα σκληρυντών. Η επιλογή του κατάλληλου σκληρυντή εξαρτάται από τις τεχνικές εφαρμογής, τον απαιτούμενο «χρόνο ζωής σε δοχείο» (pot life), τις συνθήκες σκλήρυνσης και τις επιδιωκόμενες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες. Στην πράξη τα διάφορα συστήματα εποξειδικής ρητίνης – μέσω σκλήρυνσης τροποποιούνται συνήθως με διάφορα πρόσθετα, τα οποία μπορεί να είναι αδρανή ή δραστικά, δηλαδή να αντιδρούν με την εποξυ-ομάδα. Η σύνθεση των συστημάτων αυτών κρατείται μυστική από τους παραγωγούς τους. Βασικό χαρακτηριστικό της αντίδρασης πολυμερισμού είναι η αύξηση της θερμοκρασίας που πραγματοποιείται στο μίγμα της ρητίνης με τα διάφορα πρόσθετα. Επειδή εκλύεται θερμότητα η αντίδραση του πολυμερισμού χαρακτηρίζεται ως εξώθερμη.

Από πλευράς σύστασης οι εποξειδικές ρητίνες μπορεί να είναι στέρεες ή ρευστές. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των στερεών εποξειδικών ρητινών σε σχέση με τις υγρές είναι η εύκολη επεξεργασία τους, η μηχανική αντοχή, η υψηλή χημική αντίσταση και το άριστο κολλώδες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΠΡΟΣΜΙΞΗΣ Al_2O_3 ΚΑΙ Fe_2O_3

2.1 Τριοξείδιο του αλουμινίου

2.1.1 Γενικά στοιχεία

Το τριοξείδιο του αλουμινίου, Al_2O_3 ή αλλιώς «αλουμίνα» ανήκει στην οικογένεια των κεραμικών. Τα παρακάτω βασικά χαρακτηριστικά της, την κάνουν ένα από τα πιο αποδοτικά και ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά.

- Μεγάλη σκληρότητα και υψηλή αντοχή
- Αντοχή στις εκδορές
- Υψηλό σημείο τήξης
- Μεγάλη διηλεκτρική αντοχή
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα
- Μεγάλη αντοχή σε συμπίεση
- Υψηλή ηλεκτρική αντίσταση ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες
- Χημική σταθερότητα σε μεγάλο αριθμό χημικών ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες
- Αντοχή στις απότομες μεταβολές θερμοκρασίας

Τα κεραμικά που έχουν σαν βάση την αλουμίνα, έχουν υψηλή διηλεκτρική αντοχή και χαμηλές απώλειες ισχύος και έτσι λόγω των χαμηλών διηλεκτρικών απωλειών και της λείας επιφάνειας, χρησιμοποιούνται ως υποστρώματα σε ηλεκτρονικές πλακέτες. Επίσης λόγω των χαμηλών απωλειών ισχύος, η αλουμίνα, χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που απαιτείται η μεταφορά ενέργειας μέσω κάποιου κεραμικού, όπως σε κεραίες ραντάρ [16].

Στην φύση, συναντάται σε καθαρή μορφή στο ορυκτό κορούνδιο. Αυτό όμως είναι σπάνιο γιατί το ιόν Al^{3+} έχει μικρό μέγεθος και υψηλό φορτίο όπως και το ιόν Si^{4+} . Ο συνδυασμός τους με τα αρνητικά ιόντα του Ο οδηγεί στο σχηματισμό κρυσταλλικών ενώσεων, δημιουργώντας έτσι τα αργιλοπηριτικά πετρώματα.

Οι προσμίξεις του ορυκτού κορουνδίου καθορίζουν το διαφορετικό χρώμα και την διαφορετική ονομασία του ορυκτού (ρουμίνι, σάπφειροι κτλ). Οι ενώσεις που βασίζονται στην αλουμίνα, αντιπροσωπεύουν το 25% του φλοιού της γης, με την αλουμίνα να είναι το απαραίτητο ενδιάμεσο στάδιο για την παραγωγή του μετάλλου αλουμινίου.

2.1.2 Προέλευση και Παρασκευή

Ο βωξίτης είναι το κύριο ορυκτό από την επεξεργασία του οποίου, εξάγεται η αλουμίνα. Στην πραγματικότητα ο βωξίτης είναι μίγμα ορυκτών που συντίθεται συνήθως από ένα ή και περισσότερα ένυδρα οξείδια του αλουμινίου. Η ορυκτολογική σύσταση του βωξίτη παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα, από τον οποίο είναι εμφανής η παρουσία της αλουμίνας στα τρία κυριότερα ορυκτά των βωξιτών, του γιψίτη, του μπαιμίτη και του διάσπορου.

	ΓΥΨΙΤΗΣ	ΜΠΑΙΜΙΤΗΣ	ΔΙΑΣΠΟΡΟ
ΧΗΜΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ή $\gamma\text{-Al}(\text{OH})_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ή $\gamma\text{-AlOOH}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ή $\alpha\text{-AlOOH}$
% Al	65,4%	85%	85%
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (gr/c m³)	2,42	3,01	3,44
ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΦΥΔΑΤΩΣΗΣ (°C)	150	350	450

Πίνακας 4: Ορυκτολογική σύσταση του βωξίτη [17]



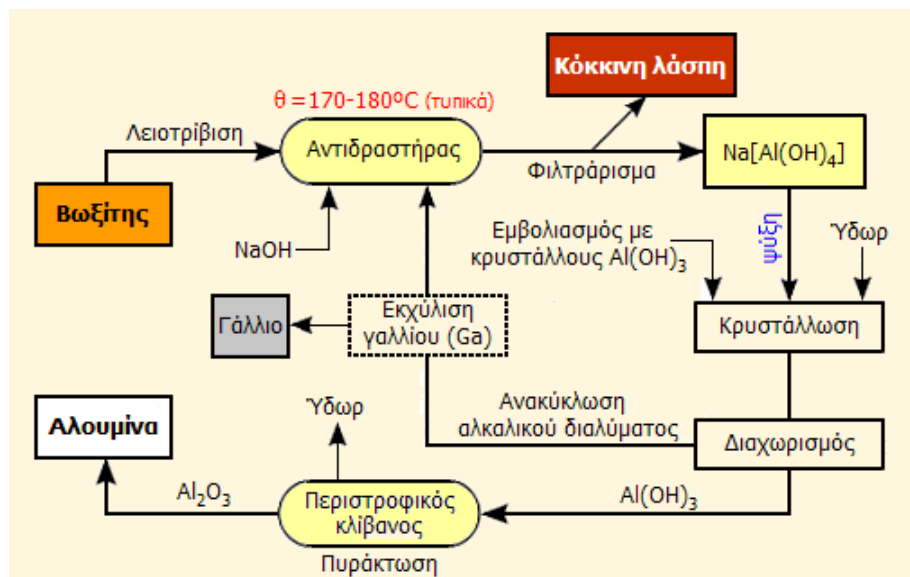
Εικόνα 1: Βωξίτης [17]

Ωστόσο αλουμίνα μπορεί να εξαχθεί και από αργιλώδη ή αργιλοπυριτικά πετρώματα. Οι διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή της, διαφέρουν ανάλογα με την πρώτη ύλη που διατίθεται, τις σχετικές τεχνικές των χημικών διαδικασιών και τις πηγές ενέργειας κάθε χώρας. Κυριότερος τρόπος παραγωγής της αλουμίνας είναι η μέθοδος Bayer, ωστόσο υπάρχουν και άλλες όπως η μέθοδος αργίλων ή παραλλαγές της μεθόδου Bayer όπως η πύρο-γενετική διαδικασία και η μέθοδος Peniakoff.

2.1.2.1 Διεργασία Bayer

Η διεργασία αυτή είναι ευρέως διαδεδομένη για την παραγωγή φθηνής αλουμίνας από βωξίτη. Τέσσερις τόνοι βωξίτη απαιτούνται για την παραγωγή δύο τόνων αλουμίνας. Το τελικό κόστος της παραγωγής, είναι συνάρτηση του βαθμού καθαρότητας της πρώτης ύλης και της κοκκομετρικής διαβάθμισης που απαιτεί ο καταναλωτής.

Κατά την διεργασία Bayer η οποία αποτυπώνεται συνοπτικά στο ακόλουθο διάγραμμα, η παραγωγή της αλουμίνας αποτελείται από τέσσερα στάδια: την προετοιμασία της πρώτης ύλης, την εκχύλιση υπό πίεση με διάλυμα καυστικού νατρίου, την καταβύθιση, και την θερμική διάσπαση



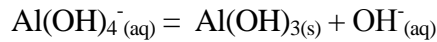
Σχήμα 8: Συνοπτικό διάγραμμα της διαδικασίας Bayer[28]

Κατά το στάδιο της προετοιμασίας ο βωξίτης θραύεται και αλέθεται για να γίνει σκόνη και έτσι διασφαλίζεται η ομοιομορφία ως προς τη χημική του σύσταση, κατά την τροφοδοσία βωξίτη. Ο βωξίτης τροφοδοσίας μπορεί να προέρχεται από ανάμιξη βωξιτών από διαφορετικές πηγές ή από χρήση αποθεμάτων βωξιτών.

Στη συνέχεια γίνεται η εκχύλιση υπό πίεση με διάλυμα καυστικού νατρίου. Για την υλοποίηση του συγκεκριμένου σταδίου ο βωξίτης αναμιγνύεται με διάλυμα καυστικής σόδας και θερμαίνεται σε αυτόκλειστα δοχεία. Αυτό είναι το πρώτο χημικό στάδιο της κατεργασίας του και περιλαμβάνει την διάλυση όλου του Al_2O_3 που περιέχεται στον βωξίτη, σε ισχυρά αλκαλικό διάλυμα $NaOH$, ώστε να παραχθεί ένα σταθερό διάλυμα, με τη μέγιστη δυνατή συγκέντρωση σε Al και με την ελάχιστη κατανάλωση.

Μετά γίνεται διαχωρισμός των στερεών και των ρευστών του αργλικού διαλύματος. Μετά την εκχύλιση, τα στερεά που προκύπτουν, περιέχουν σωματίδια με μέγεθος $>100\mu m$ τα οποία αποκαλούνται «άμμος» και πολύ λεπτότερα σωματίδια με μέγεθος $<10\mu m$. Η άμμος διαχωρίζεται πρώτα μέσα σε υδροκυκλώνες, έπειτα πλένεται με νερό κατά αντιροή για να απομακρυνθεί το αργλικό διάλυμα που τυχόν έχει συγκρατηθεί και τελικά απορρίπτεται στους χώρους απόθεσης στερεών παραπροϊόντων. Τα λεπτομερή σωματίδια καθιζάνουν σε παχυντές, δίνοντας ένα απόρριμμα γνωστό με το όνομα ερυθρά ιλύς (κόκκινη λάσπη). Η ερυθρά ιλύς πρέπει και αυτή να υποστεί πλύση με νερό για να απομακρυνθεί έτσι το αργλικό διάλυμα και μετά να αποτεθεί σε κατάλληλα σχεδιασμένους χώρους.

Ακολουθεί η καταβύθιση της ένυδρης αλουμίνας από το υπέρκορο αργλικό διάλυμα. Σκοπός του σταδίου καταβύθισης ή διάσπασης του αργλικού διαλύματος είναι η ανάκτηση του περιεχομένου εν διαλύσει σε αυτό αλουμινίου.



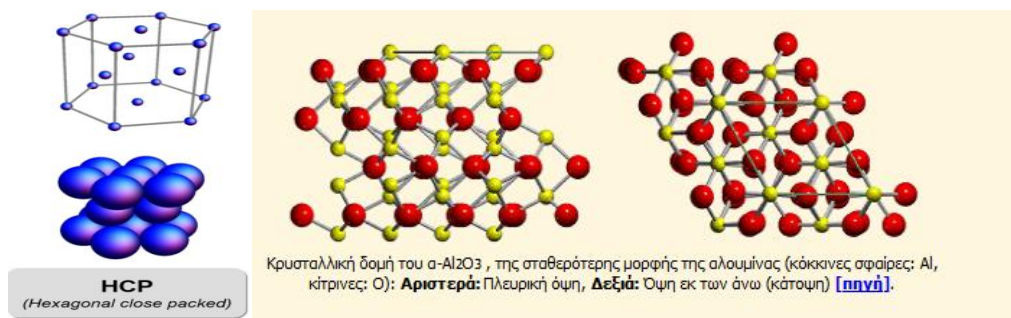
Στόχος στο στάδιο αυτό είναι να διασπαστεί το αργλικό διάλυμα με τη μέγιστη δυνατή απόδοση ανά μονάδα όγκου και να παραχθεί γιββσίτης συγκεκριμένων προδιαγραφών. Μετά το πέρας της καταβύθισης γίνεται διαχωρισμός του ιζήματος Al(OH)_3 σε χοντρό, που αποτελεί το προϊόν, και λεπτό που αποτελεί τα φύτρα προς ανακύκλωση.

Στο στάδιο της θερμικής διάσπασης, γίνεται η θερμική διάσπαση της ένυδρης αλουμίνας με σκοπό τη παραγωγή αλουμίνας που ικανοποιεί τις προδιαγραφές για μεταλλουργική χρήση.

2.1.3 Κρυσταλλική δομή

Ανάλογα της μεθόδου παρασκευής της αλουμίνας, τις προσμίξεις και της περιοχής πύρωσης της, προκύπτουν διάφοροι τύποι αλουμίνας. Αυτοί έχουν μερικώς άτακτη κρυσταλλική δομή, αλλά όλοι παρουσιάζουν μια συμπαγή (closed-packed) δομή οξυγόνου με πληθώρα ατόμων αργιλίου τοποθετημένα σε θέσεις γύρω από αυτό.

Κάθε ιόν αργιλίου, $\text{Al}(+3)$ βρίσκεται στο κέντρο ενός οκταέδρου και περιβάλλεται από 6 ιόντα οξυγόνου, $\text{O}(2-)$, σε ίσες αποστάσεις. Τα ιόντα αργιλίου καταλαμβάνουν τα $2/3$ των διαθέσιμων οκταεδρικών θέσεων της δομής HCP (Hexagonal Close Packed), αφήνοντας τις υπόλοιπες κενές, για να υπάρξει αντιστάθμιση των ηλεκτρονίων σθένους. Έτσι, στο συνολικό κρυσταλλικό σκελετό η διάταξη αυτή αντιστοιχεί στην αναλογία ατόμων αργιλίου:οξυγόνου = 2:3, που αποδίδει και ο μοριακός τύπος Al_2O_3 .



Σχήμα 9: Κρυσταλλική δομή αλουμίνας [18]

2.1.4 Τύποι Al_2O_3 - Ιδιότητες

Ανάλογα με τη θερμική επεξεργασία στην οποία υποβάλλεται το υδροξείδιο του αλουμινίου, αυτό παρουσιάζεται σε διάφορες φάσεις (α , β , γ , χ , δ , κ.α.). Η πιο σταθερή από θερμοδυναμικής άποψης φάση είναι η α - Al_2O_3 .

Ακολουθεί ανάλυση των τριών βασικότερων φάσεων της αλουμίνας.

- α - Αλουμίνα: Η α - αλουμίνα έχει εξαγωνική δομή, με 2 άτομα Al και 6 άτομα O ανά μοναδιαία κυψελίδα. Είναι η πιο σταθερή θερμοδυναμικά φάση. Ο τύπος αυτός της αλουμίνας είναι το πιο σκληρό και άκαμπτο κεραμικό οξείδιο. Η υψηλή σκληρότητά του, οι εξαιρετικές διηλεκτρικές του αντοχές, η αντοχή του στη θερμότητα κι οι καλές θερμικές του ιδιότητες το καθιστούν υλικό πρώτης επιλογής για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών
- β -Αλουμίνα: Η β -αλουμίνα προκύπτει από την αντίδραση του Al_2O_3 με το ανθρακικό νάτριο Na_2CO_3 γύρω στους 1100°C και αντιπροσωπεύει τις επιδράσεις που μπορεί να έχουν οι προσμείξεις κατιόντων στη βασική εξαγωνική δομή της αλουμίνας. Η ανάμειξη στερεού ανθρακικού νατρίου και α -αλουμίνας και η έψηση του μείγματος στους 1100°C συνιστούν έναν τυποποιημένο τρόπο παρασκευής της β -αλουμίνας με νάτριο, η οποία αποτελεί τον πρόδρομο για την παρασκευή άλλων τύπων β -αλουμίνας με εναλλαγή ιόντος. Οι νέες μέθοδοι περιλαμβάνουν επίσης και οργανικές διεργασίες.
- γ -Αλουμίνα: Η γ -αλουμίνα σχηματίζεται πριν από τον α -τύπο κατά την πύρωση του γυψίτη.

2.1.5 Εμπορικοί τύποι αλουμίνας

Άνυδρη Αλουμίνα

Η άνυδρη γνωστή και ως μεταλλουργική αλουμίνα, προκύπτει μετά από το ψήσιμο της ένυδρης ώστε να αφαιρεθεί η ποσότητα νερού που αυτή περιέχει. Τα προϊόντα άνυδρης αλουμίνας χρησιμοποιούνται ποικιλοτρόπως σε κεραμικές και πυρίμαχες εφαρμογές.

Χυτή Αλουμίνα

Χυτή ή μεταλλουργική αλουμίνα είναι το όνομα που δόθηκε στο οξειδίο του αλουμινίου που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του μετάλλου αλουμινίου. Παλαιότερα παρασκευαζόταν από υδροξείδιο του αλουμινίου με τη χρήση περιστρεφόμενων καμίνων αλλά σήμερα παράγεται σε ειδικούς ρευστοποιητές με την επεξεργασία της διαπύρωσης. Στη διαδικασία αυτή το υδροξείδιο του αλουμινίου τροφοδοτείται σε ένα ρεύμα ζεστού αέρα αντίθετης κατεύθυνσης που παράγεται από φλεγόμενο καύσιμο υγρό ή αέριο. Σαν αποτέλεσμα προκύπτει η απομάκρυνση του νερού χημικά και έτσι λαμβάνεται η άνυδρη αλουμίνα, σε εύρος θερμοκρασιών 180°C - 600°C. Περαιτέρω έκθεση του υλικού σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 1000°C οδηγεί σε πιο σταθερές α-δομές.

Ενεργή Αλουμίνα

Ο όρος αυτός αποδίδεται σε σχετικά υψηλής καθαρότητας και μικρού μεγέθους κρυστάλλους (<1μm) αλουμίνας, η οποία πυροσυσσωματώνεται σε πλήρως πυκνό σώμα σε πιο χαμηλές θερμοκρασίες από τη low ή medium soda αλουμίνα (οι χαρακτηρισμοί αφορούν στην αντίστοιχη περιεκτικότητα σε ανθρακικό νάτριο). Οι κονίες αυτές μεταφέρονται σε μύλο που σπάει τα συσσωματώματα που προκύπτουν από την ξήρανση. Χρησιμοποιείται όπου χρειάζεται υψηλή μηχανική αντοχή, θερμική και χημική σταθερότητα.

Αλουμίνα χαμηλής περιεκτικότητας σε ανθρακικό νάτριο

Πολλές εφαρμογές, συγκεκριμένα στην ηλεκτρολογία/ηλεκτρονική, απαιτούν χαμηλή περιεκτικότητα ανθρακικού νατρίου στην αλουμίνα. Έτσι ως low soda ορίζεται η αλουμίνα με περιεκτικότητα μικρότερη από 0,1% κ. β. σε ανθρακικό νάτριο.

Tabular Αλουμίνα

Αυτή είναι α-Αλουμίνα η οποία είναι είτε τηγμένη και έχει υποστεί πυρασυσσωμάτωση, είτε έχει υποστεί επανακρυσταλλοποίηση και ονομάζεται έτσι επειδή περιέχει μορφολογικά πολλά επίπεδα σχηματισμένων κρυστάλλων κορουνδίου. Παράγεται με τη συμπίεση άνυδρης αλουμίνας σε καλούπια και στη συνέχεια με θέρμανσή της σε θερμοκρασία 1700°C - 1850°C σε αξονικούς κλιβάνους. Μετά τη

θέρμανση, η χυτή αλουμίνα εξάγεται από τα καλούπια και μπορεί με θραύση, κοσκίνισμα ή άλεσμα της να παράγουμε διάφορα μεγέθη κόκκων.

Καθώς το υλικό έχει πυροσυσσωματωθεί χάνει σε μεγάλο βαθμό την πορώδη υφή του και αποκτά υψηλή πυκνότητα, χαμηλή διαπερατότητα, καλή χημική αδράνεια, γίνεται ιδιαίτερα δύστηκτο και έτσι είναι κατάλληλο για πυρίμαχες εφαρμογές.

Υψηλής καθαρότητας Αλουμίνα

Αυτού του τύπου η αλουμίνα πρέπει να έχει 99,99% καθαρότητα και κατασκευάζεται με διάφορες διαδικασίες, είτε ξεκινώντας από τη μέθοδο Bayer και στη συνέχεια με διαδοχικές διαδικασίες καθαρισμού, είτε διαμέσου χλωρίωσης για την επίτευξη του απαραίτητου βαθμού καθαρότητας. Ακόμα υψηλότερες καθαρότητες παράγονται από τη θέρμανση σε υψηλές θερμοκρασίες, θειικού άλατος αλουμινίου αμμωνίου ($\text{AlNH}_4(\text{SO}_4)_2$) ή από το μέταλλο αλουμίνιο. Στην πρώτη περίπτωση ο βαθμός καθαρότητας επιτυγχάνεται με διαδοχικές επανακρυσταλλώσεις. Ιδιαίτερα μεγάλος βαθμός καθαρότητας, στη δεύτερη περίπτωση, μπορεί να γίνει αντιδρώντας το μέταλλο με μια αλκοόλη και στη συνέχεια καθαρίζοντας το αλκοξείδιο του αλουμινίου με απόσταξη, υδρόλυση και θέρμανση.

Τηγμένη (fused) Αλουμίνα

Φτιάχνεται σε φούρνους ηλεκτρικών τόξων, με το ρεύμα να διαρρέει κατακόρυφα ηλεκτρόδια άνθρακα. Η παραγόμενη θερμότητα λιώνει την αλουμίνα. Ο φούρνος περιλαμβάνει κελί από χάλυβα το οποίο ψύχεται από νερό. Η fused αλουμίνα έχει ελάχιστα πορώδη υφή, υψηλή πυκνότητα, χαμηλή διαπερατότητα και ακόμα πιο υψηλό σημείο τήξης. Σαν αποτέλεσμα αυτών των χαρακτηριστικών χρησιμοποιείται στην κατασκευή λειαντικών και πυρίμαχων.

3.1.6 Εφαρμογές αλουμίνας

Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, σε διάφορους τομείς της αλουμίνας. Από μία ετήσια παραγωγή 60 εκατομμυρίων τόνων, το 90% χρησιμοποιείται για την κατασκευή του μετάλλου αλουμινίου. Από τις υπόλοιπες ποσότητες κατασκευάζονται διάφορα

προϊόντα, που κατανέμονται ως εξής: πυρίμαχα υλικά (50%), στιλβωτικά (20%), πύροτουβλα και μπουζί (15%), κεραμικά με χρήση στην ηλεκτρονική (10%).

Με αυτή, κατασκευάζονται λέιζερ, μονωτές υψηλής θερμοκρασίας ή υψηλής τάσης, επενδύσεις κλιβάνων, ηλεκτρικά καλώδια, ηλεκτρονικά υποστρώματα, αισθητήρες θερμοκρασίας, εργαστηριακοί σωλήνες και μέσα λείανσης.

Η αλουμίνα σε λεπτή σκόνη, χρησιμοποιείται ως προσροφητικό μέσο στα χημικά εργαστήρια με μεγάλες εφαρμογές στην χρωματογραφία. Είναι μάλιστα ισχυρότερο προσροφητικό υλικό από την πηκτική πυριτίου (ως προς τις πολικές ενώσεις).

2.2 Οξείδιο του σιδήρου

2.2.1 Γενικά στοιχεία

Υπάρχουν συνολικά 16 οξείδια σιδήρου, με τον όρο να περιλαμβάνει οξείδια, υδροξείδια ή οξυγόνο-υδροξείδια (που συνοπτικά αναφέρονται όλα σαν οξείδια σιδήρου). Τα οξείδια του σιδήρου συνθέτονται από σίδηρο Fe μαζί με οξυγόνο O και/ή με υδροξύλιο OH. Μερικά από τα πιο γνωστά οξείδια του σιδήρου είναι ο αιματίτης ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), ο μαγνητίτης (Fe_3O_4), ο μαγκεμίτης ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), οι κρυσταλλικές δομές $\beta\text{-Fe}_2\text{O}_3$ και $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$, καθώς και ο βωστίτης (FeO).

	<i>Αιματίτης</i>	<i>Μαγνητίτης</i>	<i>Μαγκεμίτης</i>
<i>Μοριακός Τύπος</i>	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Fe_3O_4	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$
<i>Πυκνότητα(g/cm³)</i>	5,26	5,18	4,87
<i>Σημείο Τήξης (°C)</i>	1350	1583-1587	-
<i>Σκληρότητα</i>	6,5	5,5	5
<i>Τύπος Μαγνήτισης</i>	Αντισιδηρομαγνητικός	Σίδηρομαγνητικός	Σιδηρομαγνητικός
<i>Θερμοκρασία Curie (K)</i>	956	850	820-986
<i>Ελεύθερη Ενέργεια (KJ/mol)</i>	-742,7	-1012,6	-711,1
<i>Κρυσταλλογραφικό Σύστημα</i>	Ρομβοεδρικό, Εξαγωνικό	Κυβικό	Κυβικό ή Τετραεδρικό
<i>Τύπος Δομής</i>	Κορουνδίου	Αντίστροφος Σπινέλιος	Ατελής Σπινέλιος

Πίνακας 5: Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων των τριών κυριότερων οξειδίων του σιδήρου [19]

2.2.2 Το οξείδιο του σιδήρου Fe_2O_3

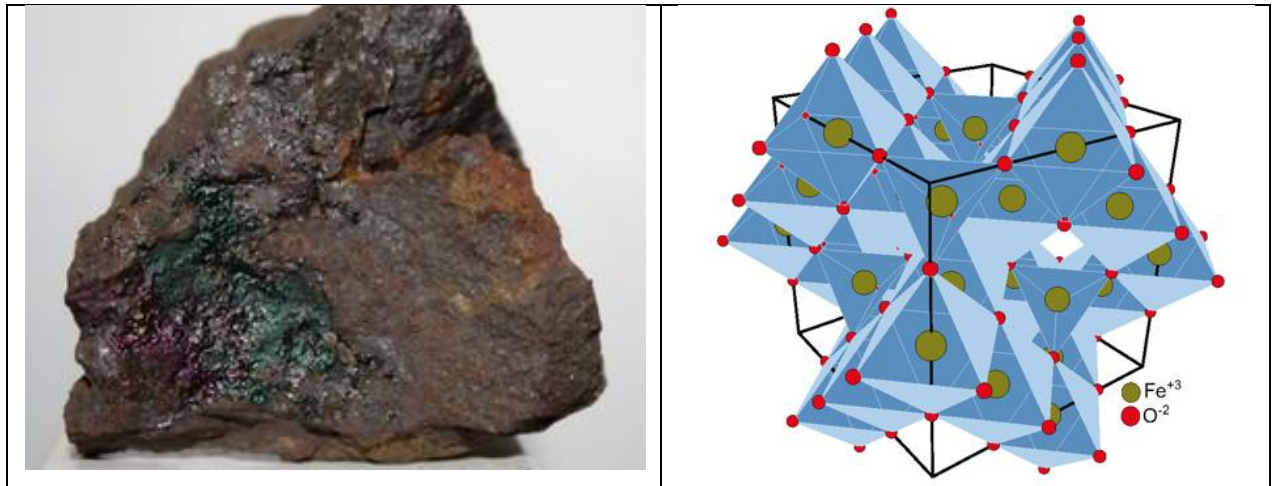
Το Fe_2O_3 εμφανίζεται κυρίως σε δύο κρυσταλλικούς τύπους, τον α και τον γ .

- **$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$** : είναι η πιο συνηθισμένη μορφή σιδήρου και έχει ρομβοειδή δομή. Σε αυτή την μορφή συναντιέται σαν ορυκτό στην φύση, γνωστό ως **αιματίτης** και εξορύσσεται ως βασικό μέταλλευμα σιδήρου. Είναι επίσης γνωστό και με την ονομασία σκουριά. Όσον αφορά το χρώμα του αιματίτη είναι συνήθως μεταλλικό γκρι, σε βοτρυοειδείς κρυστάλλους. Σπανιότερα απαντάται ως κίτρινο-ερυθρό συσσωμάτωμα, υπό την μορφή αιματο-ερυθρών κρυστάλλων. Η λάμψη του είναι μεταλλική, ενώ όσον αφορά τη διαφάνειά του είναι ολοσχερώς αδιαφανής. Οι μαγνητικές του ιδιότητες εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως πίεση, μέγεθος σωματιδίου, ένταση μαγνητικού πεδίου [19].



Εικόνα 2: Αιματίτης ποικιλίας “Υαλοκέφαλος” (Περιοχή προέλευσης Λαύριο) [20]

- **γ - Fe_2O_3** : Ο μαγκεμίτης (γ – Fe_2O_3) έχει παρόμοια δομή με αυτή του μαγνητίτη και είναι επίσης σιδηρομαγνητικός (η μαγνητική του διαπερατότητα είναι πολύ μεγαλύτερη της μονάδας). Διαφέρει από τον μαγνητίτη στο ότι όλος ή ο περισσότερος σίδηρος είναι στην τρισθενή κατάσταση. Ο μαγκεμίτης σχηματίζεται με χαμηλής θερμοκρασίας οξείδωση σπινελίου. Το σπινέλιο είναι μια κατηγορία μεικτών μεταλλικών οξειδίων με χημικό τύπο AB_2O_4 . Συνήθως το A είναι δισθενές άτομο, (Mg, Fe, Mn, Zn, Cu) και καταλαμβάνει θέσεις τετραεδρικής και οκταεδρικής συμμετρίας μέσα στον κρύσταλλο, ενώ το B είναι τρισθενές άτομο (Ti, Fe, Al, Co) και καταλαμβάνει οκταεδρικές θέσεις) που περιέχει Fe(II) όπως ο μαγνητίτης και ο τιτανικός μαγνητίτης. Το όνομά του υπαινίσσεται τον κάπως ενδιάμεσο χαρακτήρα μεταξύ του ΜΑΓνητίτη και του ΑΙΜατίτη (ΜΑGnetite + ΗΕΜatite=Maghemite). Είναι συνήθως μπλέ με γκρι σκιά, άσπρο ή καφέ. Έχει ισομετρικούς κρυστάλλους. Ο μαγκεμίτης διαμορφώνεται από την τοποτακτική οξείδωση του μαγνητίτη [19].



Εικόνα 3: Φυσική μορφή και κρυσταλλική δομή μαγνητίτη [21,22]

2.2.3 Εφαρμογές του οξειδίου του σιδήρου Fe_2O_3

Υφίσταται πλήθος εφαρμογών του οξειδίου του σιδήρου με τις κυριότερες από αυτές να συνοψίζονται στα ακόλουθα πεδία:

- Στη βιομηχανία σιδήρου, για την παραγωγή σιδήρου, χάλυβα και διάφορων κραμάτων.
- Ως γυαλιστικό σε μεταλλικά κοσμήματα και φακούς.
- Κατασκευή κοσμημάτων, ιδιαίτερα ο μαγνητίτης ο οποίος υφίσταται κάποια επεξεργασία (π.χ γυάλισμα), με την τελική του μορφή να περιέχει μια σκούρα, γυαλιστερή και στιλπνή επιφάνεια.
- Μαγνητοθεραπεία (magnet therapy).
- Κατασκευή μαγνητικών μέσων (μέσα αποθήκευσης και καταγραφής)
- Απορρύπανση υδατικών διαλυμάτων (π.χ. αποχρωματισμός ή και διάσπαση χρωστικών που προέρχονται από βιομηχανίες εκτύπωσης ή παραγωγής χρωμάτων).
- Παραγωγή μαγνητικών μελανιών
- Ως πιγμέντο (χρωστική) στα εκτυπωτικά μελάνια.
- Σε ιατρικές – καλλυντικές εφαρμογές (μίγμα ψευδαργύρου με 0,5% οξείδιο του σιδήρου αποτελεί την κρέμα καλαμίνα)
- Σε αντιδράσεις φωτοκατάλυσης [23,24]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ

3.1 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

Το μέγεθος της **ηλεκτρικής αγωγιμότητας**, εκφράζει την ευκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα περνάει μέσα από κάποιο υλικό. Ουσιαστικά αποτελεί το δυαδικό μέγεθος της ηλεκτρικής αντίστασης και για αυτό το λόγο ο υπολογισμός της προκύπτει από την αντίστροφη σχέση υπολογισμού της ηλεκτρικής αντίστασης, δηλαδή από τη σχέση

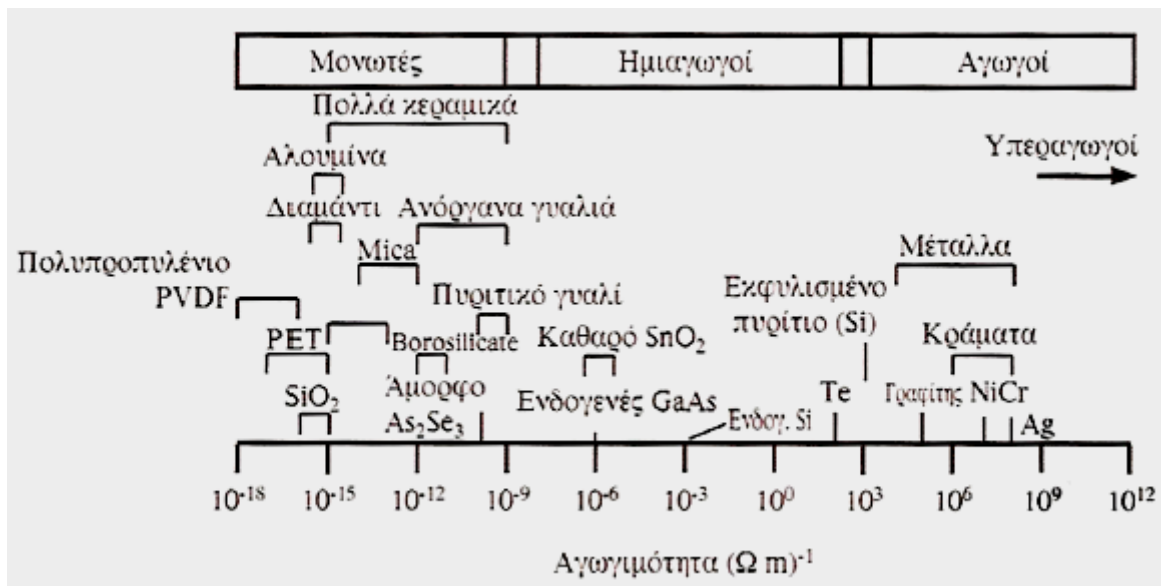
$$G \text{ (αγωγιμότητα σε Siemens)} = I \text{ (ένταση ρεύματος σε Amperes)} / V \text{ (διαφορά δυναμικού σε Volts)} = 1 / R \text{ (Αντίσταση σε Ohms)}$$

Εστιάζοντας το ζήτημα της αγωγιμότητας απολύτως στην παράμετρο του υλικού, θα πρέπει να γίνει αναφορά στο μέγεθος της **ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας** (σ σε $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$), το οποίο κατ' αναλογία αποτελεί το δυαδικό μέγεθος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (ρ σε $\Omega \text{ m}$) και εκφράζει την ιδιότητα του υλικού να εμποδίζει τη διέλευση του ρεύματος μετατρέποντας την ηλεκτρική ενέργεια σε θερμότητα.

Η σημασία της ειδικής αγωγιμότητας είναι μεγάλη όσον αφορά στην κατηγοριοποίηση των υλικών σχετικά με τη συμπεριφορά τους στη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος, όπως φαίνεται από το ακόλουθο διάγραμμα, στο οποίο μπορούν να εντοπιστούν στην πρώτη κατηγορία, αυτή των μονωτών, πλήθος πολυμερών που έχουν αναφερθεί παραπάνω. Αναλυτικότερα οι επιμέρους κατηγορίες με βάση τις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι:

- **Μονωτές ή κακοί αγωγοί:** είναι υλικά όπως τα πολυμερή και τα κεραμικά, με το εύρος των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας να είναι 10^{-20} έως $10^{-10} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$.
- **Ημιαγωγοί:** είναι υλικά όπως το πυρίτιο (Si) και το γερμάνιο (Ge) με το εύρος των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας να είναι 10^{-7} έως $10^5 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$

- **Αγωγοί:** είναι υλικά όπως τα μέταλλα (π.χ. χαλκός και άργυρος) και τα κράματα τους, με το εύρος των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας να είναι 10^5 έως $10^8 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$
- **Υπεραγωγοί:** είναι υλικά τα οποία επιδεικνύουν πρακτικά μηδενική αντίσταση για συγκεκριμένες τιμές θερμοκρασίας, έντασης μαγνητικού πεδίου και πυκνότητας ρεύματος, με την ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα να παρουσιάζει τιμές μεγαλύτερες των $10^{28} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ [8].



Σχήμα 10: Κατηγοριοποίηση υλικών με βάση την ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα [25]

Ο βαθύτερος μηχανισμός στον οποίο οφείλονται οι ιδιότητες των υλικών σε σχέση με τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος και η ένταξή τους σε μία από τις παραπάνω κατηγορίες μπορεί να αναλυθεί σύμφωνα με τη θεωρία των ενεργειακών ζωνών. Αναλυτικότερα, όταν δύο άτομα έρχονται σε μικρή απόσταση, τα ατομικά τροχιακά τους μεταβάλλονται, έτσι ώστε να δημιουργήσουν ζώνες αγωγιμότητας και σθένους με μεγάλες και μικρές τιμές ενέργειας αντίστοιχα. Όσο περισσότερο κενή είναι η ζώνη αγωγιμότητας, τόσο μεγαλύτερη δυνατότητα υπάρχει να κινηθούν ελεύθερα ηλεκτρόνια εντός αυτής.

Στους μονωτές, η ζώνη αγωγιμότητας είναι κατειλημμένη, με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια των μορίων τους να μην μπορούν να κινηθούν σε αυτή αφού απορροφήσουν ενέργεια από ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο (απαγορευτική αρχή του Pauli). Στην περίπτωση των αγωγών, η ζώνη αγωγιμότητας είναι ημικατειλημμένη με αποτέλεσμα να υπάρχει η δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας από εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο και η

μετάβαση των ηλεκτρονίων σε υψηλότερες ενεργειακά στοιβάδες (υψηλότερη θέση στη ζώνη αγωγιμότητας).

3.2 Διηλεκτρικά Μεγέθη

3.2.1 Διάκριση εννοιών διηλεκτρικού και μονωτικού υλικού

Τα διηλεκτρικά υλικά αποτελούν μια από τις τρεις μεγαλύτερες κατηγορίες υλικών όσο αφορά τις ηλεκτρικές ιδιότητες. Συχνά όμως παρατηρείται το φαινόμενο της σύγχυσης μεταξύ των εννοιών του μονωτικού και του διηλεκτρικού υλικού. Τα ηλεκτρόνια των ατόμων σε ένα διηλεκτρικό υλικό, είναι ισχυρά δεσμευμένα σε αυτά, το οποίο σημαίνει πως στη φυσική τους κατάσταση δεν έχουν ελεύθερα κινούμενα ηλεκτρόνια. Αν και δεν επιτρέπουν την ελεύθερη διέλευση του ηλεκτρικού φορτίου από τη μάζα τους, στην πράξη, πάντα κάποια ηλεκτρόνια το διαπερνούν, οπότε ένα διηλεκτρικό δεν ταυτίζεται με έναν ιδανικό μονωτή. Τοποθετώντας όμως ένα διηλεκτρικό υλικό ανάμεσα στους οπλισμούς ενός πυκνωτή παρατηρούμε πως αποθηκεύεται περισσότερη ενέργεια συγκρινόμενη με την περίπτωση όπου υπάρχει αέρας

Θα πρέπει λοιπόν να διευκρινιστεί πως ένα υλικό (στερεό ή υγρό) λέγεται διηλεκτρικό όταν έχει την ικανότητα να αποθηκεύει ενέργεια κατά την επιβολή εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου (χαρακτηριστική είναι η αύξηση της χωρητικότητας του πυκνωτή εφόσον υφίσταται διηλεκτρικό μεταξύ των οπλισμών του). Ένα διηλεκτρικό με τη σειρά του υλικό λέγεται μονωτικό όταν οι ιδιότητες του είναι τέτοιες ώστε να μπορεί να χρησιμεύσει για την ηλεκτρική μόνωση των αγωγών μεταξύ τους και μεταξύ αγωγών και εδάφους σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, παρουσιάζοντας ιδιαίτερα χαμηλή αγωγιμότητα, τόσο σε συνεχές όσο και σε εναλλασσόμενο πεδίο. Συμπερασματικά λοιπόν, η έννοια του διηλεκτρικού σχετίζεται άμεσα με τις ιδιότητες του υλικού ενώ η έννοια του μονωτικού με την πρακτική χρήση του. Στη συνέχεια θα γίνει αναφορά στα βασικά διηλεκτρικά μεγέθη, λαμβάνοντας υπόψη ότι αντικείμενο διερεύνησης στην παρούσα εργασία αποτελούν οι διηλεκτρικές ιδιότητες των εξεταζόμενων δοκιμίων.

3.2.2 Σχετική μιγαδική επιτρεπτότητα

Σύμφωνα με το νόμο του Coulomb η δύναμη μεταξύ δύο σημειακών φορτίων Q_1 και Q_2 που βρίσκονται σε απόσταση r δίνεται από τη σχέση,



όπου ϵ_0 είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού.

Στην περίπτωση που υφίσταται διηλεκτρικό υλικό με σταθερά $\epsilon > \epsilon_0$ η δύναμη γίνεται σύμφωνα με την παραπάνω σχέση μικρότερη. Η ϵ ονομάζεται **απόλυτη διηλεκτρική σταθερά ή επιτρεπτότητα** και μπορεί να γραφεί στη μορφή $\epsilon = \epsilon_r * \epsilon_0$ όπου ϵ_r η **σχετική διηλεκτρική σταθερά ή σχετική επιτρεπτότητα**.

Έτσι, στην περίπτωση ενός πυκνωτή που αποτελείται από δύο παράλληλες πλάκες εμβαδού A σε απόσταση d μεταξύ τους, η χωρητικότητά του δίνεται από τη σχέση



Η παρουσία διηλεκτρικού μειώνει το πεδίο μεταξύ των πλακών (αφού στη συγκεκριμένη περίπτωση υφίσταται ένα πεδίο πόλωσης αντίθετης φοράς), με την παραπάνω σχέση να διαμορφώνεται ως εξής:



Το ϵ (όπως και το ϵ_0) έχει διαστάσεις F/m και για έναν ιδανικό μονωτή το ϵ είναι πραγματικός αριθμός. Επειδή όμως συνήθως δεν υφίστανται ιδανικοί μονωτές, το ϵ (συνήθως συμβολίζεται και με ϵ^*) περιλαμβάνει εκτός από την πραγματική τιμή και μια φανταστική συνιστώσα που σχετίζεται με τις διηλεκτρικές απώλειες του υλικού. Σε σχέση με τις συνιστώσες, η μιγαδική απόλυτη επιτρεπτότητα γράφεται ως

Συνήθως όμως χρησιμοποιείται η σχετική μιγαδική επιτρεπτότητα, με βάση το γεγονός ότι είναι αδιάστατο. Η σχετική μιγαδική επιτρεπτότητα προκύπτει με τη διαίρεση της απόλυτης με αυτήν του κενού (συμβολίζεται επίσης ως k ή k') και είναι καθαρός αριθμός μεγαλύτερος ή ίσος του 1 (η ισότητα ισχύει μόνο για το κενό).

—

Οι δύο αυτές συνιστώσες είναι ιδιαίτερα σημαντικές για την προσέγγιση των διηλεκτρικών ιδιοτήτων του υλικού. Η πραγματική συνιστώσα αποτελεί ένδειξη για το πόση ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί στο υλικό από το επιβαλλόμενο πεδίο και λέγεται **σχετική διηλεκτρική σταθερά**, με τις τιμές της να ποικίλουν ανάλογα με το υλικό, όπως καταγράφεται στον πίνακα που ακολουθεί [12-16].

<i>Υλικό</i>	<i>Τιμή πραγματικής συνιστώσας σχετικής μιγαδικής επιτρεπτότητας</i>
Κενό	
Αέριο Μονωτικό Υλικό	
Υγρό και Στερεό Μονωτικό Υλικό	
Ημιαγωγός	
Μέταλλα	

Πίνακας 6: Τιμές πραγματικής συνιστώσας σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς σε σχέση με τα διάφορα υλικά

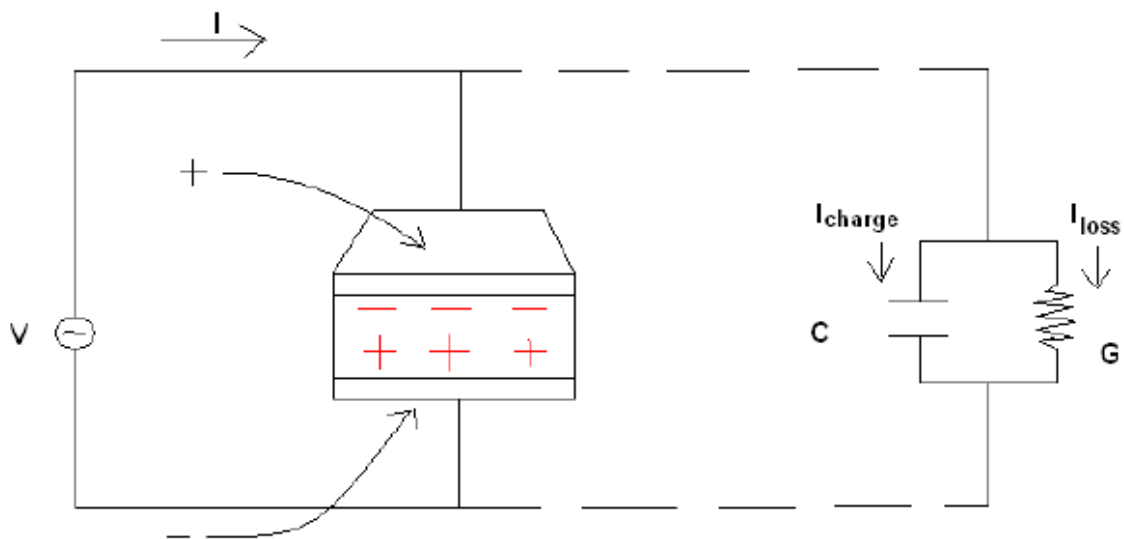
Η φανταστική συνιστώσα εκφράζει τις διηλεκτρικές απώλειες του υλικού, αποτελώντας ένα μέτρο του κατά πόσο μπορεί το υλικό να ακολουθεί τις μεταβολές του εξωτερικά επιβαλλόμενου πεδίου. Σε ένα μονωτικό υλικό θα πρέπει να ισχύει $k' \ll k''$, δηλαδή η πραγματική συνιστώσα να είναι κατά πολύ μεγαλύτερη της φανταστικής.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί πως το ϵ_r συναντάται πολλές φορές στη βιβλιογραφία με το συμβολισμό k , οπότε η παραπάνω σχέση διαμορφώνεται ως εξής

με το πραγματικό μέρος να ονομάζεται **σχετική διηλεκτρική σταθερά** ή πιο απλά **διηλεκτρική σταθερά**, προσέγγιση η οποία θα υιοθετηθεί και στη συνέχεια της παρούσας εργασίας.

3.2.3 Εναλλακτική θεώρηση της μιγαδικής διηλεκτρικής σταθεράς

Προκειμένου να μοντελοποιηθούν οι απώλειες στην περίπτωση πυκνωτή που βρίσκεται σε εναλλασσόμενο πεδίο, χρησιμοποιείται το ακόλουθο παράλληλο ισοδύναμο κύκλωμα χωρητικότητας-αγωγιμότητας (C - G), με τις απώλειες να μοντελοποιούνται ως μια αγωγιμότητα (G) που συνδέεται παράλληλα με τον ιδανικό πυκνωτή.



Σχήμα 11: Παράλληλο ισοδύναμο κύκλωμα χωρητικότητας-αγωγιμότητας (C - G) [26]

Το συνολικά μετρούμενο ρεύμα θα προέρχεται από το άθροισμα του ρεύματος φόρτισης (I_{charge}) που διαρρέει τον πυκνωτή και σχετίζεται με τη χωρητικότητα της εξεταζόμενης δομής και του ρεύματος απωλειών (I_{loss}), το οποίο με τη σειρά του σχετίζεται με την αντίσταση όγκου του υλικού, όπως περιγράφεται στην ακόλουθη σχέση.

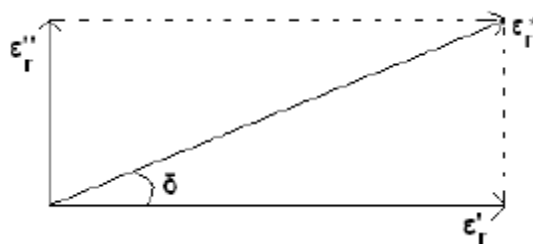
με αντικατάσταση

και

Στο πραγματικό μέρος της μιγαδικής διηλεκτρικής σταθεράς αποδίδεται η αποθήκευση των ηλεκτρικών φορτίων στον ιδανικό πυκνωτή και στη φανταστική συνιστώσα αποδίδονται οι απώλειες των ηλεκτρικών φορτίων μέσα από την αγωγιμότητα όγκου (G) του εξεταζόμενου συστήματος μόνωσης [16,26].

3.2.4 Εφαπτομένη απωλειών

Το μέγεθος της εφαπτομένης απωλειών ($\tan\delta$) αποτελεί ακόμα ένα δείγμα της δυνατότητας του υλικού να ακολουθεί τις μεταβολές του εξωτερικά επιβαλλόμενου πεδίου (γνωστής και με τον όρο χαλαρότητα). Η προσέγγιση του μεγέθους αυτού γίνεται μέσω της διανυσματικής απεικόνισης της προαναφερόμενης σχετικής μιγαδικής επιτρεπτότητας, όπως απεικονίζεται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Διάγραμμα 1: Διανυσματική απεικόνιση της σχετικής μιγαδικής επιτρεπτότητας

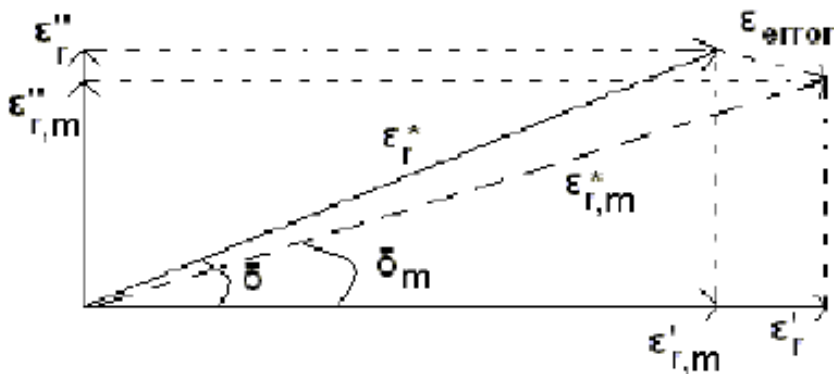
Μπορεί να παρατηρηθεί πως η πραγματική και η φανταστική συνιστώσα εμφανίζουν διαφορά φάσης 90° , με τη γωνία δ να σχηματίζεται από το διάνυσμα και την πραγματική συνιστώσα

Γενικά ως αναμενόμενα επίπεδα “χαλάρωσης” για το κάθε υλικό αναφέρεται η αναλογία της απολεσθείσας ενέργειας προς την αποθηκευόμενη ενέργεια. Τα ρεύματα φόρτισης και απωλειών είναι ανάλογα της ενέργειας που αποθηκεύεται και της ενέργειας που εκλύεται με μορφή θερμότητας αντίστοιχα, οπότε σε κάθε συχνότητα ισχύει

— — —

Επομένως το μέτρο της εφαπτομένης απωλειών καθορίζει την αναλογία της ενέργειας που εκλύεται προς εκείνη που αποθηκεύεται στο χρόνο μιας περιόδου εκφράζοντας κατά μία έννοια τη χαλαρότητα του υλικού ενώ η γωνία δ εκφράζει την διαφορά φάσης (χρονική προπορεία) με την οποία το διηλεκτρικό υλικό παρακολουθεί την μεταβολή του πεδίου.

Σημειώνεται ότι στον υπολογισμό της εφαπτομένης απωλειών θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και το σφάλμα που υπεισέρχεται στη διαδικασία μέτρησης. Έτσι στις περιπτώσεις που η αγωγιμότητα G είναι πολύ μικρή όπως τα ισχυρά μονωτικά υλικά το διάνυσμα ϵ_r^* προσεγγίζει αυτό του ϵ_r' και η $\tan\delta \rightarrow 0$, λαμβάνει δηλαδή ιδιαίτερα μικρές θετικές τιμές. Όμως κάθε διάταξη μέτρησης έχει και αυτή έναν δικό της σφάλμα μέτρησης του οποίου είναι επίσης διανυσματικό και υπεισέρχεται στην μέτρηση. Έτσι, όταν το μέτρο του διανυσματικού σφάλματος ϵ_{error} της μετρητικής διάταξης γίνει μεγαλύτερο του μέτρου του ϵ_r'' του μετρούμενου υλικού, η συνολικά μετρούμενη γωνία δ_{error} μπορεί να γίνει αρνητική [16,26].



Σχήμα 12: Διανυσματικό διάγραμμα της μιγαδικής επιτρεπτότητας λαμβάνοντας υπόψη το διάνυσμα σφάλματος ϵ_{error} . Ο δείκτης m δηλώνει τις μετρούμενες τιμές

Επειδή λοιπόν $I_{\text{loss}} \rightarrow 0$, πρέπει η γεωμετρία του συστήματος ηλεκτροδίων μέτρησης να είναι τέτοια ώστε να ενισχύει το σήμα του I_{loss} , προκειμένου να μπορεί να καταγραφεί από μιας υψηλής ακρίβειας γέφυρα LCR σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με αύξηση του εμβαδού των οπλισμών, είτε με επιλογή των κατάλληλων υλικών για την κατασκευή του κελιού μετρήσεων.

3.3 Ιδιότητες ηλεκτρομονωτικών υλικών

Οι ιδιότητες των ηλεκτρομονωτικών υλικών, αναφέρονται

- στις ηλεκτρικές: εκφράζονται από την **ειδική αντίσταση όγκου (σ)** και **επιφανείας (σ_e)**
- τις διηλεκτρικές: εκφράζονται από τη μιγαδική διηλεκτρική σταθερά (k) που περιλαμβάνει τη **διηλεκτρική σταθερά (k')** και τις ηλεκτρικές απώλειες του υλικού, οι οποίες εκφράζονται με τη σειρά τους μέσω της **$\tan\delta$**

Βασικό χαρακτηριστικό αυτών των ιδιοτήτων είναι η εξάρτησή τους από τις επικρατούσες συνθήκες, όπως [16,26].

- η συχνότητα,
- η θερμοκρασία, η κατεύθυνση του υλικού,
- η πίεση λειτουργίας και
- η συνολική δομή του υλικού.

3.3.1 Ειδική αγωγιμότητα όγκου (σ) και επιφάνειας (σ_e)

Τα συγκεκριμένα μεγέθη περιγράφουν την αγωγιμότητα των στερεών μονωτικών σωμάτων, με την τιμή τους να εξαρτάται από το εύρος και την πυκνότητα του ενεργειακού διακένου μεταξύ της ζώνης σθένους και της ζώνης αγωγιμότητας. Όταν το διάκενο είναι μεγάλο τότε η αγωγιμότητα είναι μικρή. Γενικότερα, η τιμή της αγωγιμότητας όγκου (σ) είναι κατά πολύ μικρότερη από αυτή της επιφάνειας, με τα μέταλλα να διακρίνονται για τη μεγάλη τιμή της ειδικής αγωγιμότητας όγκου σε αντίθεση με τους μονωτές.

Όσον αφορά στην ειδική επιφανειακή αγωγιμότητα (σ_e), εξαρτάται από την παρουσία υγρασίας και ρύπανσης στην επιφάνεια του σώματος και συνδέεται με την παρουσία του ρεύματος ερπυσμού [26].

3.3.2 Απορρόφηση ενέργειας στα μονωτικά υλικά

Μια χαρακτηριστική ιδιότητα των μονωτικών υλικών είναι ότι κατά την ύπαρξή τους εντός ενός ηλεκτρομαγνητικού (H/M) πεδίου απορροφούν, ακόμη κι αν είναι λίγη, ενέργεια από το πεδίο η οποία μετατρέπεται σε θερμότητα. Η απορρόφηση της ενέργειας οφείλεται στο φαινόμενο Joule και την επαγόμενη δημιουργία ρεύματος διαρροής στην περίπτωση συνεχούς τάσης, ενώ στην περίπτωση εναλλασσόμενων πεδίων η απώλεια ενέργειας οφείλεται και επιπλέον στις περιοδικές πολώσεις και αποπολώσεις. Η σχέση που αποδίδει αυτή την απώλεια ενέργειας είναι η ακόλουθη

όπου E_m είναι η μέγιστη τιμή της έντασης του πεδίου.

Σε περίπτωση που αυτή η μετατροπή της θερμότητας και η απαγωγή της στο περιβάλλον δε λειτουργεί ικανοποιητικά, το υλικό επιδέχεται αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του με αποτέλεσμα την επιβάρυνση του υλικού και την κακή του λειτουργία.

3.3.3 Μηχανισμοί Πόλωσης

Πρόκειται για εκείνους τους μηχανισμούς στους οποίους μπορεί να αποδοθεί η διαμόρφωση της μιγαδικής επιτρεπτότητας του διηλεκτρικού υλικού.

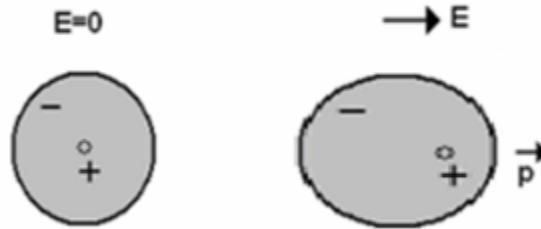
Στα διηλεκτρικά υλικά, υπάρχει μια χωρική κατανομή ηλεκτρικών φορτίων, που όταν επιβληθεί εξωτερικό H/M πεδίο αλλάζει. Για να παραμείνει το συνολικό φορτίο σταθερό, τα φορτία αυτά πολώνονται και προσανατολίζονται σε αντίθετες κατευθύνσεις, ώστε να υπάρξει αντιστάθμιση των θετικών και αρνητικών

Επειδή η πόλωση περιλαμβάνει κίνηση φορτίων απαιτείται ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα που εξαρτάται από την αδράνεια των φορτίων για να ολοκληρωθεί και έτσι για κάθε διηλεκτρικό μηχανισμό υπάρχει ένα όριο συχνοτήτων πάνω από το οποίο η πόλωση δεν είναι δυνατόν να παρακολουθήσει τις μεταβολές του πεδίου.

Έτσι, διακρίνονται σε:

- **ηλεκτρονική πόλωση** η οποία παρατηρείται έως τις οπτικές συχνότητες. Αφορά κάθε άτομο ή μόριο σε όλα τα υλικά και περιλαμβάνει τη μετατόπιση του κέντρου

μάζας του νέφους ηλεκτρονίων εξαιτίας του H/M πεδίου ώστε να σχηματιστούν δίπολα. Η θερμοκρασία δεν επηρεάζει και το φαινόμενο αυτό γίνεται πολύ γρήγορα



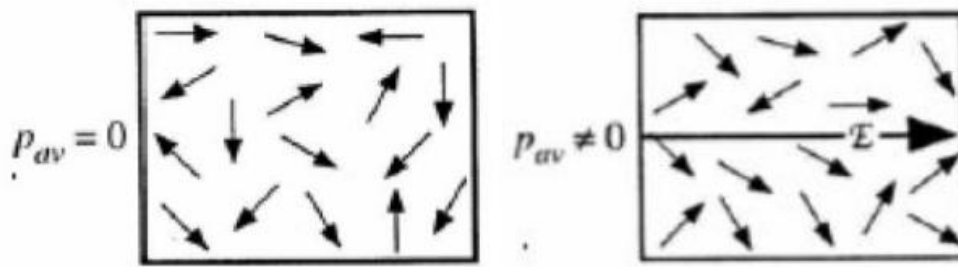
Σχήμα 13: Μηχανισμός ηλεκτρονικής πόλωσης [27]

- **ιοντική πόλωση** η οποία υφίσταται μέχρι τις υπέρυθρες συχνότητες και αφορά υλικά τα μόρια των οποίων φτιάχνουν ιόντα που δεν διαχωρίζονται από χαμηλές θερμοκρασίες ή ασθενή H/M πεδία. Εδώ εκτός από την ηλεκτρονική πόλωση έχουμε και ελαστικές μετατοπίσεις των ιόντων δημιουργώντας έτσι επιπλέον δίπολα. Και σε αυτή την περίπτωση η θερμοκρασία δεν επηρεάζει



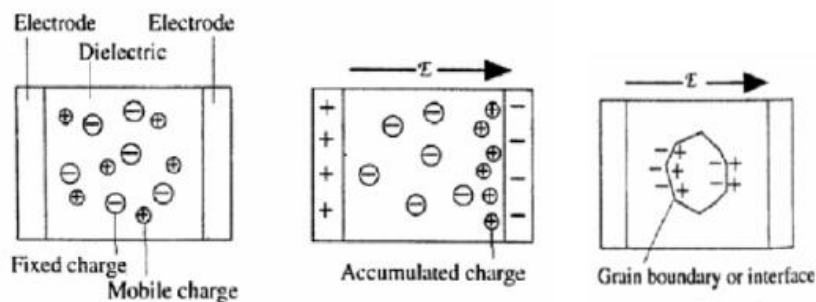
Σχήμα 14: Μηχανισμός ηλεκτρονικής πόλωσης [27]

- **διπολική πόλωση** η οποία παρατηρείται σε υλικά που τα μόρια τους εμφανίζουν μόνιμες διπολικές ροπές και αφορά συχνότητες μέχρι την τάξη των MHz ή GHz. Χωρίς την εφαρμογή εξωτερικού πεδίου η συνολική πόλωση είναι μηδέν. Με εφαρμογή, τα δίπολα προσανατολίζονται μερικώς, και άρα προκύπτει γραμμική εξάρτηση του P με το E του H/M πεδίου. Ο μηχανισμός αυτός επηρεάζεται από τη θερμοκρασία αντιστρόφως ανάλογα, είναι αρκετά γρήγορος ώστε να μπορεί να ακολουθήσει σε συχνότητες της τάξης των $10^{11} - 10^{12}$ Hz [27].



Σχήμα 15: Μηχανισμός διπολικής πόλωσης [27]

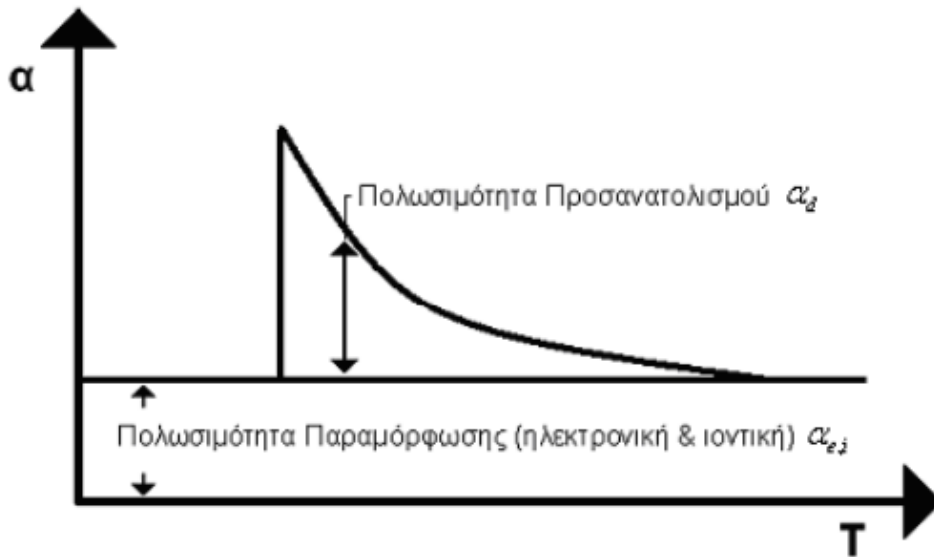
- **διεπιφανειακή** πόλωση η οποία παρατηρείται κυρίως σε σύνθετα διηλεκτρικά και γίνεται αντιληπτή σε συχνότητες μερικών δεκάδων ή εκατοντάδων Hz [26, 28-30]. Όταν υφίσταται ένας “κακός” συνδυασμός από διαφορετικά διηλεκτρικά υλικά σε ένα σύνθετο υλικό, τότε μέσα σε ένα Η/Μ πεδίο παρατηρείται απόθεση κινούμενων θετικών και αρνητικών φορτίων στις διεπιφάνειες των υλικών, δημιουργώντας έτσι κάποια είδη διπόλων. Πρόκειται για αργό φαινόμενο, που γίνεται αντιληπτό στο φάσμα των συχνοτήτων ισχύος. Κάτι άλλο που μπορεί να βοηθήσει στη δημιουργία πόλωσης είναι η μεταφορά φορτίων από στάθμη σε στάθμη, με το συγκεκριμένο φαινόμενο να απαντάται συνήθως στις εφαρμογές ισχύος των μονωτικών υλικών. Η πόλωση αυτή εξαρτάται επίσης έντονα από τη θερμοκρασία και εξελίσσεται αργά [27].



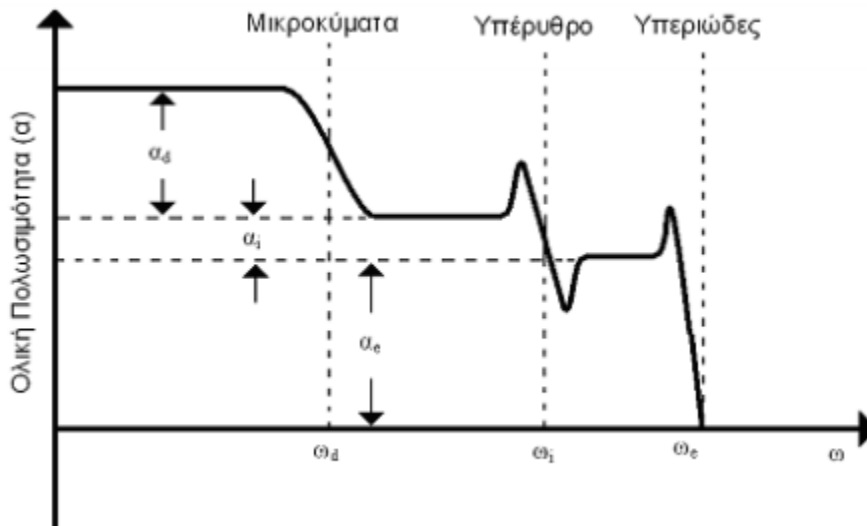
Σχήμα 16: Σχηματική συνοπτική περιγραφή ειδών πόλωσης [18,19]

Η εξάρτηση των ειδών πόλωσης από τη θερμοκρασία και τη συχνότητα περιγράφεται από τα αντίστοιχα ακόλουθα διαγράμματα. Ειδικότερα όσον αφορά στην εξάρτηση από τη συχνότητα (εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο), στην περιοχή από $\omega = 0$ έως $\omega = \omega_a$ όπου ω_a είναι μια συχνότητα συνήθως στην περιοχή των μικροκυμάτων, η πόλωση είναι ουσιαστικά σταθερή. Στην τιμή της ω_a η πόλωση μειώνεται απότομα

εξαιτίας του ότι η συνιστώσα προσανατολισμού παύει να συνεισφέρει στην ολική. Αντίστοιχα, για συχνότητες μεγαλύτερες του υπέρυθρου (ορατό και υπεριώδες φάσμα), παραμένει ενεργή μόνο η ηλεκτρονική πόλωση ενώ σε ακόμα μεγαλύτερες συχνότητες μηδενίζεται η ηλεκτρονική πόλωση [2,31].



Σχήμα 17: Εξάρτηση της πόλωσης από τη θερμοκρασία [2,31]



Σχήμα 18: Εξάρτηση της πόλωσης από τη συχνότητα [2,31]

3.3.4 Επιθυμητές ιδιότητες μονωτικών υλικών

Οι επιθυμητές κάθε φορά ιδιότητες ενός μονωτικού υλικού είναι άμεση συνάρτηση της εφαρμογής και των ιδιαίτερων συνθηκών για την οποία προορίζεται. Επίσης, το μέγεθος που θα χρησιμοποιηθεί για να εκφράσει αυτές τις ιδιότητες εξαρτάται από την καταλληλότητα αυτών των μεγεθών σε σχέση με τις συνθήκες της εφαρμογής

- Στο εναλλασσόμενο πεδίο χρειάζονται υλικά με μικρό ϵ_r και $\tan\delta$ (στις συχνότητες που μας ενδιαφέρουν).
- Στο συνεχές πεδίο χρειάζονται υλικά με μικρή τιμή για σ και σ_e .
- Σε διατάξεις υψηλών τάσεων, ενδιαφέρει η διηλεκτρική αντοχή (η οποία αποδίδει τη μέγιστη πεδιακή ένταση που μπορεί να εφαρμοστεί στο μονωτικό υλικό χωρίς να πραγματοποιηθεί διάσπαση),

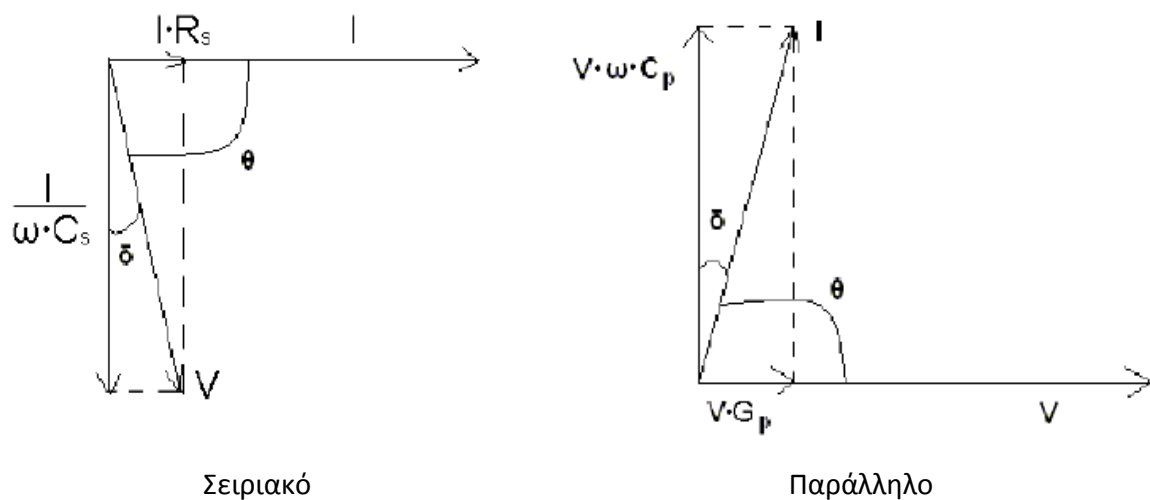
Άλλες ιδιότητες που λαμβάνονται υπόψη είναι το κόστος (με ζητούμενο ασφαλώς τα χαμηλά επίπεδα της παραμέτρου), η θερμική αντοχή, η θερμική αγωγιμότητα (θερμότητα που απάγεται λόγω ηλεκτρικών απωλειών), η μηχανική αντοχή, η χημική σταθερότητα, η υγροσκοπικότητα (κατά πόσο δηλαδή το υλικό απορροφά την υγρασία του περιβάλλοντος), η αντοχή στις ακτινοβολίες, η πυκνότητα, το ιξώδες (για υγρά μονωτικά), και η αντοχή σε βιολογικές επιδράσεις, όπως από έντομα ή μικροοργανισμούς.

Ενδεικτικά, χαρακτηριστικά εύρη επιθυμητών τιμών είναι για τους πυκνωτές μεγάλη χωρητικότητα, μεγάλη ειδική αντίσταση σε εφαρμογές συνεχούς ρεύματος, χαμηλή τιμή της εφαιπτομένης απωλειών και μικρή διηλεκτρική σταθερά στις υψίσυχνες εφαρμογές κτλ., με το τελικό ζητούμενο να μπορεί τελικά να απαιτεί την εύρεση ενός σημείου ισορροπίας ανάμεσα στις διάφορες εμπλεκόμενες ιδιότητες [26].

3.4 Διηλεκτρικές Μετρήσεις

3.4.1 Ισοδύναμα κυκλώματα (παράλληλο και σειριακό)

Για να μελετηθεί η συμπεριφορά ενός πυκνωτή παραλλήλων πλακών χρησιμοποιείται το ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα το οποίο περιλαμβάνει μια αντίσταση και μια χωρητικότητα συνδεδεμένες είτε σε σειρά είτε παράλληλα (με τη δεύτερη να αποτελεί και τη συνηθέστερη επιλογή). Τα διανυσματικά διαγράμματα ρευμάτων και τάσεων για τα δύο ισοδύναμα κυκλώματα είναι τα ακόλουθα:



Σχήμα 19: Διανυσματικά διαγράμματα ρευμάτων και τάσεων ισοδύναμων κυκλωμάτων με πυκνωτή παράλληλων πλακών

Θα πρέπει να σημειωθεί πως οι αντίστοιχες γωνίες θ , δ των δύο σχημάτων ταυτίζονται, αφού και τα δύο κυκλώματα περιγράφουν το ίδιο φυσικό σύστημα και πως στην ανάλυση που έχει προηγηθεί έχει χρησιμοποιηθεί το παράλληλο ισοδύναμο κύκλωμα. Απομένει επομένως η σύνδεση των διηλεκτρικών μεγεθών με τα αντίστοιχα μεγέθη για το σειριακό ισοδύναμο προκειμένου να υφίσταται η πληρότητα στη δυνατότητα των μετρήσεων, όπως περιγράφονται από τις ακόλουθες σχέσεις (όπου με R_s , C_s συμβολίζονται η αντίσταση και η χωρητικότητα του σειριακού κυκλώματος, ενώ με $R_p=1/G_p$ και C_p τα αντίστοιχα μεγέθη του παραλλήλου κυκλώματος).

Σχέση μεταξύ σειριακών και παράλληλων μεγεθών:

$$\tan \delta = \omega \cdot R_S \cdot C_S = \frac{1}{\omega \cdot C_P \cdot R_P}, \quad \tan \delta = \cot \theta = \frac{X_P}{R_P} = \frac{G}{\omega \cdot C_P} = \frac{1}{\omega \cdot C_P \cdot R_P} = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'}$$

Αντικαθιστούμε και βρίσκουμε τη σχέση μεταξύ παράλληλης χωρητικότητας και σειριακών μεγεθών:

$$C_P = \frac{C_S}{1 + \tan^2 \delta} \Rightarrow C_P = \frac{1}{1 + \omega^2 \cdot R_S^2 \cdot C_S^2}$$

Επίσης έχουμε:

$$\frac{R_P}{R_S} = \frac{1 + \tan^2 \delta}{\tan^2 \delta} = 1 + \frac{1}{\tan^2 \delta}$$

Έτσι τελικά προκύπτουν για το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς :

$$\varepsilon_r' = \frac{C_P}{C_0} \Rightarrow \varepsilon_r' = \frac{C_S}{C_0 \cdot (1 + \omega^2 \cdot R_S^2 \cdot C_S^2)}, \quad \varepsilon_r'' = \omega \cdot R_S \cdot C_S \cdot \varepsilon_r' = \frac{\omega \cdot R_S \cdot C_S^2}{C_0 \cdot (1 + \omega^2 \cdot R_S^2 \cdot C_S^2)}$$

3.4.2 Διηλεκτρική φασματοσκοπία

Οι διηλεκτρικές ιδιότητες ενός υλικού μεταβάλλονται όπως προαναφέρθηκε σε σχέση με τη συχνότητα και τη θερμοκρασία. Η διαδικασία με την οποία καταγράφεται αυτή η μεταβολή ονομάζεται διηλεκτρική φασματοσκοπία, αντικατοπτρίζοντας ουσιαστικά την ικανότητα μόνωσης του υλικού. Η διαδικασία βασίζεται στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ γνωστών ηλεκτρικών ποσοτήτων (dielectric response methods). Η βασική εξίσωση της διαδικασίας είναι η ακόλουθη

όπου P και E είναι τα διανύσματα της πόλωσης και της έντασης του πεδίου αντίστοιχα, ενώ με χ συμβολίζεται η ηλεκτρική επιδεκτικότητα του υλικού (ϵ_0 είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού). Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη εξίσωση σε οποιοδήποτε διηλεκτρικό ($\chi > 0$) μια οποιαδήποτε μείωση του E θα οδηγήσει σε σταδιακή αποπόλωση ή χαλάρωση (μείωση της πόλωσης).

3.4.3 Διηλεκτρικά υλικά low και high-k

Μια κατηγοριοποίηση των διηλεκτρικών υλικών σχετίζεται με το επίπεδο αναφοράς της τιμής της διηλεκτρικής σταθεράς k για το διοξείδιου του πυριτίου (SiO_2) ($k=3,9$). Διακρίνονται έτσι τα διηλεκτρικά υλικά low- k (εκείνα δηλαδή που έχουν διηλεκτρική σταθερά χαμηλότερη από την αντίστοιχη του πυριτίου) και τα διηλεκτρικά υλικά high- k (με τιμή υψηλότερη). Η συγκεκριμένη κατηγοριοποίηση έχει να κάνει με τις εφαρμογές των διηλεκτρικών υλικών, με την κατηγορία των low- k να προτιμάται στη μικροηλεκτρονική εξαιτίας των ιδιοτήτων της μείωσης των χωρητικότητων των γραμμών αλλά και της ευεργετικής επίδρασης τους στην κατανάλωση ισχύος και την κατηγορία των high- k να προτιμώνται στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και για την κατασκευή διατάξεων αυξημένης χωρητικότητας [16,28,32,33].

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

4.1 Χρησιμοποιούμενα Υλικά

Κατά το πειραματικό στάδιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, παρασκευάστηκαν δοκίμια από σκέτη ρητίνη καθώς και δοκίμια ρητίνης με προσμίξεις σωματιδίων οξειδίου του αργιλίου ή οξειδίου του σιδήρου, σε διαφορετικά ποσοστά συγκέντρωσης. Στη συνέχεια μετρήθηκε η μονωτική τους ικανότητα εφαρμόζοντας τάση σε χαμηλές - βιομηχανικές συχνότητες (20Hz- 1MHz) και σε ψηλές- τηλεπικοινωνιακές συχνότητες (1MHz- 1GHz).

4.1.1 Η εποξειδική ρητίνη των δοκιμίων

Για την παρασκευή της μήτρας ρητίνης χρησιμοποιήθηκε η εποξειδική ρητίνη Epoxol 2847 της εταιρίας Neotex. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ρητίνης αυτής, όπως δίνονται από την εταιρία, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Η ρητίνη παρασκευάστηκε έπειτα από την πρόσμιξη δύο συστατικών μερών, όπου και τα δύο ήταν σε υγρή μορφή. Η αναλογία ανάμιξης των δύο συστατικών ήταν 100 A: 58 B, όπου

Συστατικό A: Καθαρή ρητίνη.

Συστατικό B: Σκληρυντής, ο οποίος αναμιγνύμενος με το συστατικό 1, προκαλεί πλήρη στερεοποίηση του συστήματος.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Μορφή μείγματος	Διαφανές
Πυκνότητα	1,09g/cm ³
Αναλογία ανάμειξης(κατά βάρος)	100A:58B
Χρόνος σκλήρυνσης (+25°C)	3 ώρες περίπου
Χρόνος εργασιμότητας (Pot life) (+25°C)	1,5 ώρα
Απόκτηση πλήρους σκληρότητας	7 ημέρες

Αντοχές του συγκεκριμένου προϊόντος μετά την ανάμειξη:

Σε συνεχή θερμοκρασία (HDT)	+46°C
Αντοχή σε εφελκυσμό (DIN 53452)	38 N/mm ²
Αντοχή σε κάμψη (DIN 53452)	80 N/mm ²
Αντοχή σε θλίψη (DIN 53452)	82 N/mm ²
Σκληρότητα-Shore D 15" (ASTM 2240)	83
Αντοχή σε τριβή (ASTM D 4060, TABER TEST, CS 10/1000/1000)	72 mg
Αντοχή σε κρούση (EN ISO 6272)	IR4
Αντοχή σε πρόσφυση (EN 13892-8)	≥ 2,5 N/mm ² (θραύση σκυροδέματος)

Πίνακας 7: Τεχνικά χαρακτηριστικά εποξειδικής ρητίνης Epoxol 2847

4.1.1 Οξείδιο του Αλουμινίου

Ως μέσο πρόσμειξης χρησιμοποιήθηκε τριοξείδιο του αλουμινίου, με μορφή πορώδης πούδρας, της εταιρείας MERCK, τα χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πορώδης πούδρα αλουμίνας
• Εταιρία: MERCK
• Κωδικός: 1077
• Μέγεθος κόκκων: 63- 200μm
• Μοριακή μάζα: 101.96
• CAS number: 1344-28-1
• Βαθμός ενεργότητας :1
• Περιεκτικότητα σε νερό: 0,2% max
• pH: 6,8 – 7,8

Πίνακας 8: Τεχνικά χαρακτηριστικά χρησιμοποιούμενης πούδρας αλουμίνας

4.2 Περιγραφή της διαδικασίας παρασκευής και των χρησιμοποιούμενων οργάνων

4.2.1 Η διαδικασία παρασκευής

Η παρασκευή των δοκιμών πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Γενικής Χημείας Α της σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, ενώ οι δοκιμές της μόνωσης έλαβαν χώρα στο εργαστήριο Ηλεκτροτεχνικών Υλικών της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ.

Κατά την πρώτη φάση του πειραματικού μέρους, παρασκευάστηκαν η μήτρα σκέτης ρητίνης καθώς και οι μήτρες ρητίνης με προσμίξεις Fe_2O_3 στις εξής συγκεντρώσεις:

[1] 0, 1% επί της συνολικής ποσότητας της ρητίνης (δοκίμιο No 1 Fe_2O_3)

[2] 1% επί της συνολικής ποσότητας της ρητίνης (δοκίμιο No 2 Fe_2O_3)

[3] 5% επί της συνολικής ποσότητας της ρητίνης (δοκίμιο No 3 Fe_2O_3)

Σε μεταγενέστερο χρόνο περίπου μιας εβδομάδας, στο ίδιο εργαστήριο, παρασκευάστηκαν μια μήτρα πάλι σκέτης ρητίνης καθώς και μήτρες ρητίνης με προσμίξεις Al_2O_3 σε συγκεντρώσεις

[1] 0 1% επί της συνολικής ποσότητας της ρητίνης (δοκίμιο No 1 Al_2O_3)

[2] 1% επί της συνολικής ποσότητας της ρητίνης (δοκίμιο No 2 Al_2O_3)

[3] 5% επί της συνολικής ποσότητας της ρητίνης (δοκίμιο No 3 Al_2O_3)

Οι μήτρες σκέτης ρητίνης παρασκευάστηκαν με σκοπό να αποτελέσουν το μέτρο σύγκρισης, για το πόσο επηρεάζουν οι προσμίξεις Al_2O_3 και Fe_2O_3 τις ηλεκτρικές ιδιότητες των σύνθετων πολυμερών.

Η διαδικασία παρασκευής των μητρών από σκέτη ρητίνη, ήταν η εξής:

1. Αρχικά έγινε ο υπολογισμός του συστατικού A (καθαρή ρητίνη) και του συστατικού B (σκληρυντής).
 - Έχοντας ως δεδομένο το μέγεθος του καλουπιού (πλαστικό κυλινδρικού σχήματος) στο οποίο θα τοποθετούνταν η μήτρα, θεωρήθηκε ότι τα 25g ήταν μια ικανοποιητική ποσότητα για την παρασκευή μιας μήτρας σκέτης ρητίνης (για να συγκριθούν στη συνέχεια τα σύνθετα δοκίμια προσμίξεων Fe_2O_3). Έτσι σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή ρητίνης για αναλογία 100A:58B και προκειμένου να παρασκευαστούν 25g ρητίνης, απαιτήθηκαν από το A συστατικό $A=15,82g$ και από το B συστατικό $B=9,18g$ (Για την ζύγιση των ποσοτήτων χρησιμοποιήθηκε ζυγός ακριβείας του οποίου τα χαρακτηριστικά περιγράφονται στην ακόλουθη ενότητα των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν).
 - Παρομοίως, για την παρασκευή της άλλης μήτρας από σκέτη ρητίνη (αυτής με την οποία θα συγκρίνονταν τα σύνθετα δοκίμια με προσμίξεις Al_2O_3) απαιτήθηκαν 20g και έτσι για αναλογία 100A:58B χρησιμοποιήθηκαν από το A $A=12,66g$ και από το B $B=7,34g$.
2. Μετά τον υπολογισμό των συστατικών, αυτά τοποθετήθηκαν σε γυάλινο δοχείο των 50 ml.
3. Αρχικά η ανάδευση των συστατικών έγινε με το χέρι με μεταλλικό εργαλείο και στην συνέχεια το μίγμα τοποθετήθηκε για 5min σε λουτρό υπερήχων προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη διασπορά.
4. Τέλος το μίγμα τοποθετήθηκε σε πλαστικό καλούπι, το οποίο και φυλάχθηκε σε σκοτεινό μέρος σε συνθήκες δωματίου για περίπου μια εβδομάδα.

Η διαδικασία παρασκευής των δοκιμίων ρητίνης με προσμίξεις Fe_2O_3 ήταν η εξής:

1. Αρχικά έγινε ο υπολογισμός των ποσοτήτων ρητίνης και πούδρας Fe_2O_3 για τις διάφορες συγκεντρώσεις.
 - **δοκίμιο No 1 (συγκέντρωσης 0,1% Fe_2O_3):** Για να παρασκευαστούν 22gr ρητίνης απαιτούνταν από το A=13,92gr και από το B=8,08gr, ενώ προκειμένου να πετύχουμε συγκέντρωση 0,1% επί της συνολικής ποσότητας ρητίνης (δηλαδή για τα 22gr) η ποσότητα της πρόσμιξης πούδρας που απαιτούνταν ήταν $\Gamma = 0,02\text{gr Fe}_2\text{O}_3$.
 - **δοκίμιο No 2 (συγκέντρωσης 1% Fe_2O_3):** Για να παρασκευαστούν 20gr ρητίνης απαιτούνταν από το A=12,66gr και από το B=7,34gr, ενώ προκειμένου να πετύχουμε συγκέντρωση 1% επί της συνολικής ποσότητας ρητίνης (δηλαδή για τα 20gr) η ποσότητα της πρόσμιξης πούδρας που απαιτούνταν ήταν $\Gamma = 0,2\text{gr Fe}_2\text{O}_3$.
 - **δοκίμιο No 3 (συγκέντρωσης 5% Fe_2O_3):** Για να παρασκευαστούν 20gr ρητίνης απαιτούνταν από το A=12,66gr και από το B=7,34gr, ενώ προκειμένου να πετύχουμε συγκέντρωση 5% επί της συνολικής ποσότητας ρητίνης (δηλαδή για τα 20gr) η ποσότητα της πρόσμιξης πούδρας που απαιτούνταν ήταν $\Gamma = 1\text{gr Fe}_2\text{O}_3$.
2. Μετά τον υπολογισμό των συστατικών, αυτά τοποθετήθηκαν σε γυάλινο δοχείο των 50 ml.
3. Αρχικά η ανάδευση των συστατικών έγινε με το χέρι με μεταλλικό εργαλείο και στην συνέχεια το μίγμα τοποθετήθηκε για 5min σε λουτρό υπερήχων προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη διασπορά.
4. Τέλος το μίγμα τοποθετήθηκε στο πλαστικό καλούπι το οποίο και φυλάχθηκε σε σκοτεινό μέρος σε συνθήκες δωματίου για περίπου μια εβδομάδα.

Η διαδικασία παρασκευής των δοκιμών ρητίνης με προσμίξεις Al_2O_3 ήταν η εξής:

1. Αρχικά έγινε ο υπολογισμός των ποσοτήτων ρητίνης και πούδρας Al_2O_3 για τις διάφορες συγκεντρώσεις.
 - **δοκίμιο No 1 (συγκέντρωσης 0,1% Al_2O_3):** Για να παρασκευαστούν 20gr ρητίνης απαιτούνταν από το A=12,66gr και από το B=7,34gr, ενώ προκειμένου να πετύχουμε συγκέντρωση 0,1% επί της συνολικής ποσότητας ρητίνης (δηλαδή για τα 20gr) η ποσότητα της πρόσμιξης πούδρας που απαιτούνταν ήταν $\Gamma = 0,02\text{gr Al}_2\text{O}_3$.

- **δοκίμιο Νο 2 (συγκέντρωσης 1% Al_2O_3):** Για να παρασκευαστούν 20gr ρητίνης απαιτούνταν από το A=12,66gr και από το B=7,34gr, ενώ προκειμένου να πετύχουμε συγκέντρωση 1% επί της συνολικής ποσότητας ρητίνης (δηλαδή για τα 20gr) η ποσότητα της πρόσμιξης πούδρας που απαιτούνταν ήταν $\Gamma=0,2\text{gr Al}_2\text{O}_3$.
 - **δοκίμιο Νο 3 (συγκέντρωσης 5% Al_2O_3):** Για να παρασκευαστούν 22gr ρητίνης απαιτούνταν από το A=13,92gr και από το B=8,08gr, ενώ προκειμένου να πετύχουμε συγκέντρωση 5% επί της συνολικής ποσότητας ρητίνης (δηλαδή για τα 22gr) η ποσότητα της πρόσμιξης πούδρας που απαιτούνταν ήταν $\Gamma=1,1\text{gr Al}_2\text{O}_3$.
2. Μετά τον υπολογισμό των συστατικών, αυτά τοποθετήθηκαν σε γυάλινο δοχείο των 50 ml.
 3. Αρχικά η ανάδευση των συστατικών έγινε με το χέρι με μεταλλικό εργαλείο και στην συνέχεια το μίγμα τοποθετήθηκε για 5min σε λουτρό υπερήχων προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη διασπορά
 - Παρατήρηση: η παρασκευή του δοκιμίου Νο3 Al_2O_3 χρειάστηκε να επαναληφθεί μετά περίπου από μια εβδομάδα, γιατί κατά την αρχική παρασκευή, οι κόκκοι της αλουμίνας είχαν «καθίσει» στον πυθμένα του δοκιμίου. Οπότε αποφασίστηκε να επαναληφθεί η παρασκευή του ακολουθώντας την ίδια διαδικασία αλλά παραλείποντας το λουτρό υπερήχων.
 4. Τέλος το μίγμα τοποθετήθηκε στο πλαστικό καλούπι το οποίο και φυλάχθηκε σε σκοτεινό μέρος σε συνθήκες δωματίου για περίπου μια εβδομάδα.

Μετά την στερεοποίηση όλων των δοκιμίων, έγινε η εξαγωγή τους από τα πλαστικά καλούπια και στάλθηκαν σε εργαστήριο τόννου για να κοπούν σε δίσκους. Από το κάθε δοκίμιο προέκυψαν 4 δίσκοι με περίπου το ίδιο πάχος (3mm) και ο 5ος με αρκετά μεγαλύτερο πάχος από τους προηγούμενους. Αυτό συνέβη γιατί ο 5ος δίσκος ήταν η βάση στήριξης του κάθε δοκιμίου στο μηχάνημα κοπής. Έτσι, λόγω του μεγάλου πάχους του ο 5^{ος} δίσκος δεν μπορούσε να τοποθετηθεί ανάμεσα στα ηλεκτρόδια της γέφυρας υψηλών συχνοτήτων και για λόγους ομοιομορφίας στην διαδικασία των διηλεκτρικών μετρήσεων ο δίσκος αυτός αποκλείστηκε από τις μετρήσεις.

4.2.2 Τα χρησιμοποιούμενα όργανα κατά την διαδικασία παρασκευής

Ο Ζυγός ακριβείας Ohaus Galaxy 110

Ο συγκεκριμένος ζυγός ακριβείας έχει ακρίβεια 4 δεκαδικών ψηφίων και μέγιστη μέτρηση τα 110gr. Οι δυνατότητες μέτρησης του ζυγού επαρκούσαν πλήρως για την τάξη μεγέθους των ποσοτήτων που απαιτήθηκαν κατά το στάδιο της παρασκευής των δοκιμίων.



Εικόνα 4: Ο Ζυγός ακριβείας Ohaus Galaxy 110

Λουτρό υπερήχων Elma Transsonic T460

Το συγκεκριμένο λουτρό υπερήχων χρησιμοποιήθηκε για την καλύτερη ανάδευση του σύνθετου υλικού και την ομοιόμορφη κατανομή των προσμίξεων στον όγκο του. Στην μεταλλική του λεκάνη που περιείχε νερό μέχρι τα 2/3 της χωρητικότητας της, τοποθετήθηκε το γυάλινο δοχείο με το σύνθετο υλικό προς ανάδευση.



Εικόνα 5: Λουτρό υπερήχων Elma Transsonic T460

4.3 Περιγραφή των χρησιμοποιούμενων οργάνων και της διαδικασίας μετρήσεων στις χαμηλές συχνότητες

Για να μελετηθούν οι επιδράσεις που έχουν οι προσμίξεις του Fe_2O_3 και του Al_2O_3 στις διηλεκτρικές ιδιότητες των πολυμερικών μητρών, στο φάσμα των χαμηλών-βιομηχανικών συχνοτήτων (20Hz - 1MHz), πρέπει να υπολογιστούν η **διηλεκτρική σταθερά** και η **εφαπτόμενη απωλειών** του σύνθετου υλικού των δίσκων που παρασκευάστηκαν.

4.3.1 Χρησιμοποιούμενα όργανα για τις μετρήσεις των χαμηλών συχνοτήτων

Ως όργανα μέτρησης χρησιμοποιήθηκαν η γέφυρα LCR χαμηλών συχνοτήτων του εργαστηρίου Ηλεκτροτεχνικών Υλικών και το κελί διηλεκτρικών μετρήσεων που ανήκουν στον εξοπλισμό της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ.

Η γέφυρα χαμηλών συχνοτήτων HP 4283A Precision LCR Meter

Η γέφυρα χαμηλών συχνοτήτων HP 4283A Precision, είναι μια γενικής χρήσης LCR γέφυρα, με την οποία μπορεί να ελεγχθεί η ποιότητα υλικών παραγωγής, καθώς και υλικών για ερευνητικούς σκοπούς, σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων (από 10 έως 1MHz) και για σήματα από 5mV έως 40Vrms. Η ακρίβεια της μέτρησης της χωρητικότητας είναι της τάξης του 0,05% και για τον συντελεστή απωλειών είναι της τάξης του 0,0005%, ενώ έχει ανάλυση έξι δεκαδικών σε όλες τις συχνότητες δοκιμής.



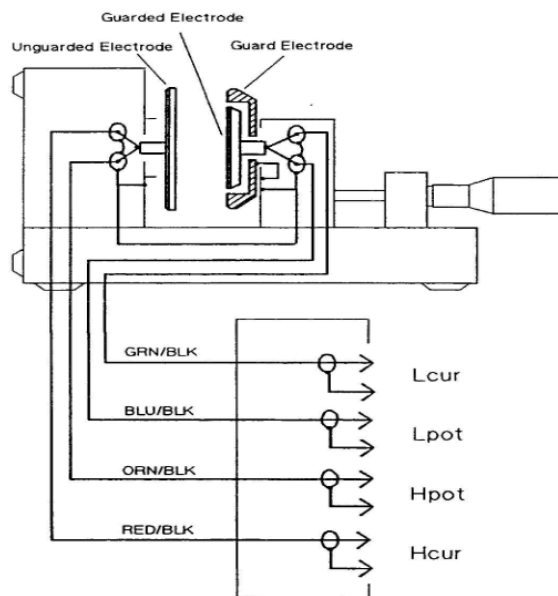
Εικόνα 6: Η γέφυρα χαμηλών συχνοτήτων HP 4283A Precision

Επίσης με την χρήση της κάρτας επικοινωνίας HP-IB, η γέφυρα μπορεί να συνδεθεί με υπολογιστή και με την βοήθεια κατάλληλου λογισμικού, να γίνει η επεξεργασία των μετρήσεων και ο χαρακτηρισμός των υπό εξέταση υλικών.

Το κελί διηλεκτρικών μετρήσεων HP 16451B

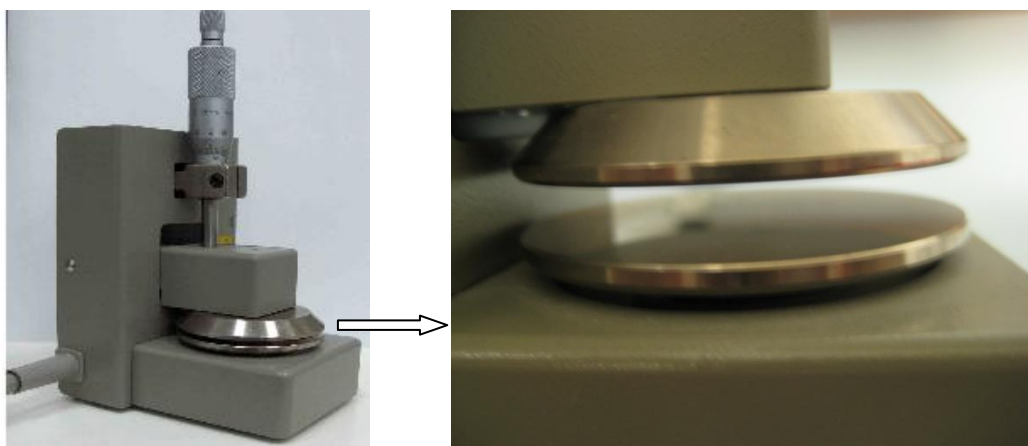
Για τις διηλεκτρικές μετρήσεις των υλικών, η γέφυρα χαμηλών συχνοτήτων συνεργάζεται με το HP 16451B κελί, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συχνότητες μέχρι και 15 Hz και πρόκειται ουσιαστικά για μια δοκιμαστική διάταξη που τα βασικά του στοιχεία είναι οι δύο μεταλλικές παράλληλες πλάκες (ηλεκτρόδια), που σχηματίζουν έναν πυκνωτή. Τα ηλεκτρόδια αυτά, ανάλογα με το μέγεθος της πλάκας διακρίνονται σε

- Ηλεκτρόδια με μεγάλη πλάκα
- Ηλεκτρόδια με μικρή πλάκα και
- Ηλεκτρόδια για δείγματα με εξάχνωση λεπτού μεταλλικού στρώματος



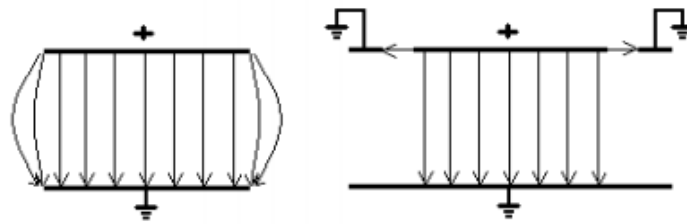
Σχήμα 20: Περιγραφή διάταξης λειτουργίας κελιού διηλεκτρικού μετρήσεων

Στις μετρήσεις των δοκιμίων της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα ηλεκτρόδια με την μεγάλη πλάκα (τύπου A), αυτά δηλαδή που το εμβαδόν τους είναι μεγαλύτερο από τα δισκία. Οπότε και χρειάστηκε κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων να γίνει η αναγωγή του εμβαδού των ηλεκτροδίων, σε αυτή των δοκιμίων.



Σχήμα 21: Κελί διηλεκτρικών μετρήσεων HP 1641B Dielectric Test Fixture

Σε κάθε είδος ηλεκτροδίων, το κάτω ηλεκτρόδιο (unguarded electrode) είναι εικονικά γειωμένο μέσω του ακροδέκτη L_p , και στο πάνω ηλεκτρόδιο (guarded electrode) υπάρχει ένας εξωτερικός δακτύλιος που επίσης γειώνεται (guard electrode). Έτσι προκύπτει ένα σταθερό ηλεκτρικό πεδίο ανάμεσα στις πλάκες, γιατί οι δυναμικές γραμμές που ξεκινούν από την περιφέρεια του προστατευμένου ηλεκτροδίου καταλήγουν γραμμικά στο γειωμένο δακτύλιο και όχι μέσω καμπύλης διαδρομής, για να μην λαμβάνονται υπόψη στις μετρήσεις.



Σχήμα 22: Δημιουργούμενο ηλεκτρικό πεδίο μέσω του κελιού διηλεκτρικών μετρήσεων

Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων του κελιού μπορεί να μετρηθεί μέσω βερνιέρου, με ακρίβεια εκατοστού του χιλιοστού, ενώ μέσω των τετραπολικών καλωδίων που διαθέτει το κελί, αντισταθμίζονται όλες οι θερμοκρασιακές μεταβολές για θερμοκρασίες από 0 έως και 55°C.



Εικόνα 7: Η χρησιμοποιούμενη διάταξη (υπολογιστής – γέφυρα) για τη διαδικασία των μετρήσεων

4.3.2 Η διαδικασία μετρήσεων στην γέφυρα χαμηλών συχνοτήτων

Κατά την διαδικασία αυτή, αρχικά το υπό εξέταση δοκίμιο τοποθετούνταν στο κελί και με την βοήθεια του βερνιέρου καταγραφόταν το πάχος του. Στην συνέχεια μέσω της

γέφυρας LCR και του υπολογιστή γινόταν η μέτρηση των μεγεθών C_p και G . Για τον υπολογισμό των μεγεθών αυτών, ορίζονταν οι παρακάτω παράμετροι στον υπολογιστή:

1. Κλίμακα συχνοτήτων: Λογαριθμική
2. Μεγέθη προς μέτρηση: $C_p - G$
3. Εύρος συχνοτήτων: 20Hz-1MHz
4. Bias : 0, (συνεχή συνιστώσα εφαρμοζόμενης τάσης)
5. Χρόνος μεταξύ μετρήσεων: 1 s
6. Πλάτος εναλλασσόμενου σήματος: 2000 mV
7. Integration factor: short

Μετά την ολοκλήρωση της μέτρησης, αφαιρούνταν το υπό εξέταση δοκίμιο και με την βοήθεια και πάλι του βερνιέρου, τοποθετούνταν τα ηλεκτρόδια του κελιού μέτρησης σε απόσταση ίση με το πάχος του δοκιμίου που μετρήθηκε αρχικά. Με αυτό τον τρόπο υπολογιζόταν η χωρητικότητα του αέρα, C_{p0} . Τέλος τα δεδομένα αποθηκεύονταν στον υπολογιστή προς επεξεργασία.

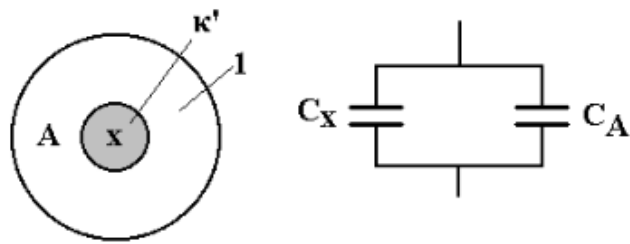
Δεδομένου ότι το εμβαδόν των ηλεκτροδίων του κελιού μέτρησης ήταν μεγαλύτερο από αυτό του δισκίου, έπρεπε να γίνει η αναγωγή των εμβαδών τους. Συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η σχετική διηλεκτρική σταθερά ορίζεται ως

— μόνον όταν το εμβαδόν του υλικού μέτρησης είναι ίδιο με το εμβαδόν του κελιού μέτρησης. Διαφορετικά, όταν το εμβαδόν του δοκιμίου (S_x) είναι μικρότερο από αυτό του κελιού ($S_{ολ}$), θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας και μια παράλληλη χωρητικότητα (S_A) αυτή της κενής επιφάνειας. Επομένως η χωρητικότητα C_p που υπολογίστηκε από την γέφυρα LCR αρχικά, ισοδυναμεί με το άθροισμα δύο παράλληλων χωρητικοτήτων, μιας του δοκιμίου C_x και μιας της κενής επιφάνειας C_A με

όπου

και

και d το πάχος του υλικού.



Σχήμα 23: Σχηματική αναγωγή του κελιού μέτρησης στο μέγεθος του δισκίου

ενώ η μετρούμενη χωρητικότητα κενού είναι

Άρα η μετρούμενη από την γέφυρα LCR σχετική διηλεκτρική σταθερά είναι

Από όπου προκύπτει η πραγματική τιμή της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού

Ανάλογα και με τον υπολογισμό της φανταστικής διηλεκτρικής σταθεράς, αυτή ορίζεται ως _____ μόνον όταν το εμβαδόν του υλικού μέτρησης είναι ίδιο με το εμβαδόν του κελιού μέτρησης. Διαφορετικά, όταν το εμβαδόν του δοκιμίου (S_x) είναι μικρότερο από αυτό του κελιού ($S_{ολ}$), θα πρέπει αντί της μετρούμενης αγωγιμότητας G να χρησιμοποιηθεί η G_{eq} που είναι αυτή που αντιστοιχεί σε ολόκληρη την επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Δεδομένου ότι $G_{eq} = \sigma \cdot S_{ολ} / d$ και $G_x = \sigma \cdot S_x / d$ προκύπτει ότι $G_{eq} = G \cdot S_{ολ} / S_x$ οπότε η φανταστική διηλεκτρική σταθερά του υλικού είναι

και άρα η εφαπτομένη απωλειών είναι $\tan \delta = \quad /$

4.4 Περιγραφή των χρησιμοποιούμενων οργάνων και της διαδικασίας μετρήσεων στις υψηλές συχνότητες

4.4.1 Χρησιμοποιούμενα όργανα για τις μετρήσεις των υψηλών συχνοτήτων

Για τον υπολογισμό της διηλεκτρικής σταθεράς και της εφαπτομένης απωλειών των σύνθετων πολυμερικών υλικών στις υψηλές συχνότητες, χρησιμοποιήθηκε η γέφυρα LCR Agilent 4287ARF και το κελί διηλεκτρικών μετρήσεων στερεών Agilent 16453A

Η γέφυρα υψηλών συχνοτήτων Agilent 4287ARF Meter

Πρόκειται μια γέφυρα LCR σε ένα εύρος συχνοτήτων από το 1MHz έως και τα 3GHz με βήμα 100kHz. Μπορεί να πραγματοποιήσει μετρήσεις 11 παραμέτρων με χρόνο μέτρησης τα 9ms και χρησιμοποιείται όταν απαιτείται ο υπολογισμός της σύνθετης αντίστασης ενός υλικού σε υψηλές συχνότητες καθώς και για ερευνητικές-εργαστηριακές δοκιμές. Ο χειρισμός της γίνεται μέσω υπολογιστή και συνεργάζεται με το κελί διηλεκτρικών μετρήσεων Agilent 16453A



Εικόνα 8: Η γέφυρα υψηλών συχνοτήτων Agilent 4287ARF Meter

Το κελί διηλεκτρικών μετρήσεων Agilent 16453A

Είναι μια δοκιμαστική διάταξη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συχνότητες από 1MHz έως 1GHz. Τα ηλεκτρόδια του είναι δύο παράλληλες πλάκες με διάμετρο 6,95mm



Εικόνα 9: Το κελί διηλεκτρικών μετρήσεων Agilent 16453A

4.4.2 Η διαδικασία μετρήσεων στην γέφυρα υψηλών συχνοτήτων

Κατά την διαδικασία αυτή, αρχικά το υπό εξέταση δοκίμιο τοποθετούνταν στο κελί και με την βοήθεια της γέφυρας LCR και του υπολογιστή, γινόταν απευθείας ο υπολογισμός της χωρητικότητας C_p του δοκιμίου, της ωμικής του αντίστασης και της **εφαπτομένης απωλειών D** ($\tan\delta$), για εύρος συχνοτήτων από 1MHz έως 1GHz.

Για τον υπολογισμό της διηλεκτρικής σταθεράς k' χρησιμοποιήθηκε ο τύπος

—

όπου C_0 η χωρητικότητα του κενού. Η γέφυρα υψηλών συχνοτήτων δεν μπορεί να μετρήσει την χωρητικότητα κενού, έτσι χρησιμοποιήθηκε η σχέση

$$- \quad \epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{F/m} \text{ και } S = \pi \cdot R^2 \text{ με } R \text{ η ακτίνα του ηλεκτροδίου } R = 3,475 \text{mm} \text{ και}$$

$d = 3 \text{mm}$ το πάχος του δοκιμίου το οποίο θεωρήθηκε ίδιο για όλα τα δοκίμια. Σε αυτή την περίπτωση στις μετρήσεις μας υπεισέρχονται τα σφάλματα της τιμής της χωρητικότητας του κενού και του πάχους του δοκιμίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΡΗΜΑΤΩΝ

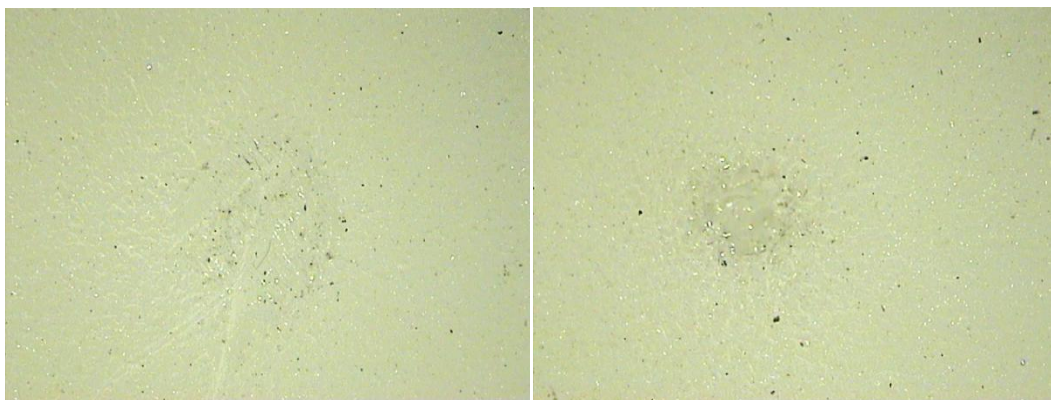
5.1 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων, των μετρήσεων μόνωσης στην γέφυρα υψηλών συχνοτήτων για το Al_2O_3 και του Fe_2O_3

Με το πέρας των μετρήσεων στην γέφυρα υψηλών συχνοτήτων, τα αποτελέσματα αποθηκεύονται για περαιτέρω επεξεργασία.

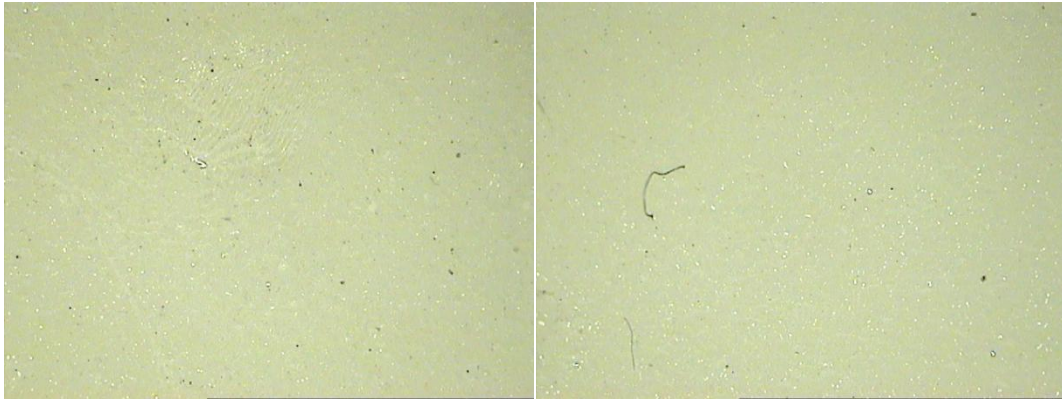
Μετρήσεις στην LCR γέφυρα				υπολογισμοί					
Cp[F]	D	Rp[ohm]	FREQ[Hz]	d(m)	R(m)	S($\pi \cdot R^2$)	ϵ_0	Co($=\epsilon_0 \cdot S/d$)	K'($=Cp/Co$)
7,32E-13	0,3515	618400	1,00E+06	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	6,58410
5,33E-13	0,2205	677300	2,00E+06	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	4,79040
5,33E-13	0,1507	660700	3,00E+06	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	4,79130
5,26E-13	0,1259	600600	4,00E+06	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	4,72926
5,24E-13	0,1065	570300	5,00E+06	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	4,71128
5,22E-13	0,09543	532200	6,00E+06	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	4,69599
5,18E-13	0,09437	465600	7,00E+06	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	4,65284
5,19E-13	0,084	456300	8,00E+06	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	4,66722
5,17E-13	0,08473	404100	9,00E+06	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	4,64385
5,18E-13	0,08301	370400	1,00E+07	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	4,65374
5,05E-13	0,06689	235400	2,00E+07	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	4,54315
4,99E-13	0,06175	172300	3,00E+07	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	4,48201
4,93E-13	0,06251	129200	4,00E+07	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	4,42986
4,89E-13	0,06362	102400	5,00E+07	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	4,39300
4,85E-13	0,06325	86500	6,00E+07	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	4,35883
4,82E-13	0,06427	73430	7,00E+07	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	4,33186
4,79E-13	0,06513	63740	8,00E+07	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	4,30848
4,77E-13	0,06289	58980	9,00E+07	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	4,28600
4,75E-13	0,06212	53970	1,00E+08	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	4,26802
4,61E-13	0,05835	29560	2,00E+08	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	4,14754
4,54E-13	0,05815	20080	3,00E+08	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	4,08461
4,49E-13	0,05787	15320	4,00E+08	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	4,03516
4,44E-13	0,0566	12680	5,00E+08	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	3,98750
4,39E-13	0,05687	10620	6,00E+08	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	3,94704
4,36E-13	0,05699	9160	7,00E+08	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	3,91647
4,32E-13	0,05757	7998	8,00E+08	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	3,88501
4,28E-13	0,05621	7346	9,00E+08	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	3,85084
4,26E-13	0,05706	6552	1,00E+09	3,02E-03	3,48E-03	3,79E-05	8,85E-12	1,11E-13	3,82746

Παραπάνω παρουσιάζεται ένας ενδεικτικός πίνακας αποτελεσμάτων, των μετρήσεων όπως ελήφθησαν στην γέφυρα υψηλών συχνοτήτων για τον δίσκο Νο 1 της ρητίνης και των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν. Ο όρος D αναφέρεται στην εφαπτομένη απωλειών tanδ.

Για να γίνει η σύγκριση και να εξαχθούν τα συμπεράσματα για το κατά πόσο επηρεάζουν οι προσμίξεις του Al_2O_3 και Fe_2O_3 τις διηλεκτρικές ιδιότητες των σύνθετων πολυμερών, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε γραφικές παραστάσεις ομαδοποιημένα ανάλογα με τον αριθμό του δίσκου στο οποίο τεμαχίσθηκε το δοκίμιο. Επιλέχθηκε αυτός ο τρόπος παρουσίασης, ώστε σε περίπτωση που η διασπορά των προσμίξεων στον όγκο του δοκιμίου δεν ήταν ομοιόμορφη, να υπάρχει ένα κοινό σημείο αναφοράς που θα είναι η απόσταση του δίσκου από την επιφάνεια του δοκιμίου. Προκειμένου να διαπιστωθεί εάν είχαμε καθίζηση άρα και διαφορετική συγκέντρωση του υλικού σε κάθε δίσκο, ελήφθησαν απεικονίσεις των επιφανειών για τους δίσκους Νο1 και 4 στο μικροσκόπιο, όπου φαίνεται πως η διασπορά του υλικού δεν παρουσιάζει μεγάλες ορατές διακυμάνσεις όσο αφορά το Al_2O_3 .

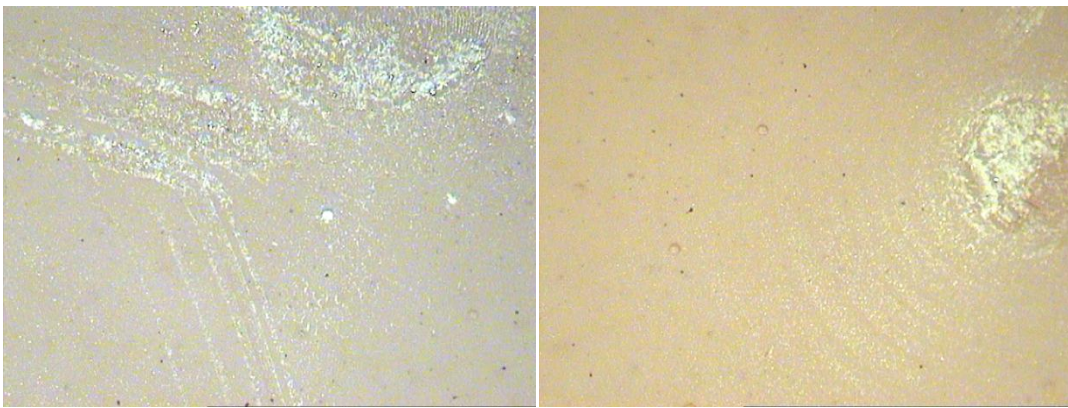


Εικόνα 10: Απεικόνιση της επιφάνειας του δίσκου 1(αριστερά) και του δίσκου 4(δεξιά) για συγκέντρωση 0,1% σε Al_2O_3 , στο μικροσκόπιο

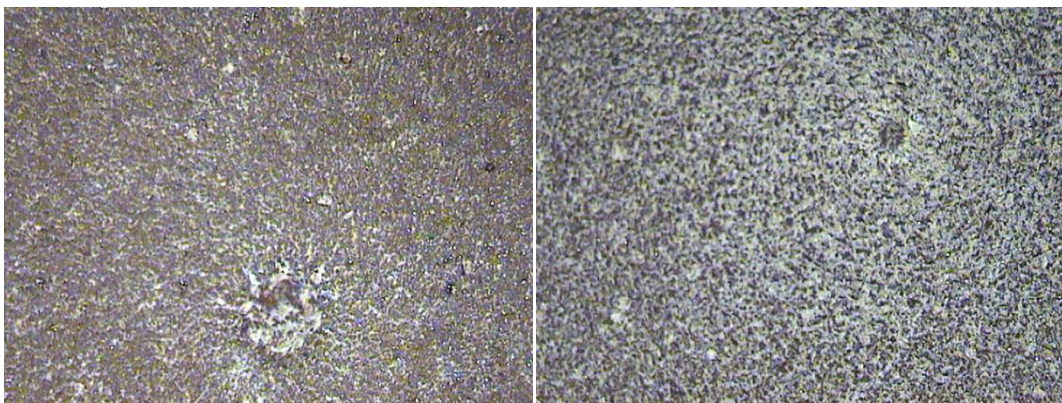


Εικόνα 11: Δίσκος 1(αριστερά) και δίσκος 4(δεξιά)για συγκέντρωση 5% σε Al_2O_3

Όσο αφορά τις συγκεντρώσεις του Fe_2O_3 , οι διαφορές στις συγκεντρώσεις των διαφόρων δίσκων είναι ορατές, οπότε και αναμένεται να έχουμε μεγάλες διακυμάνσεις στον τρόπο που επηρεάζεται η επαφτομένη απωλειών και η διηλεκτρική σταθερά από δίσκο σε δίσκο.



Εικόνα 12: Απεικόνιση της επιφάνειας του δίσκου 1(αριστερά) και του δίσκου 4(δεξιά)για συγκέντρωση 0,1% σε Fe_2O_3 , στο μικροσκόπιο



Εικόνα 13: Δίσκος 1(αριστερά) και δίσκος 4(δεξιά)για συγκέντρωση 5% σε Fe_2O_3

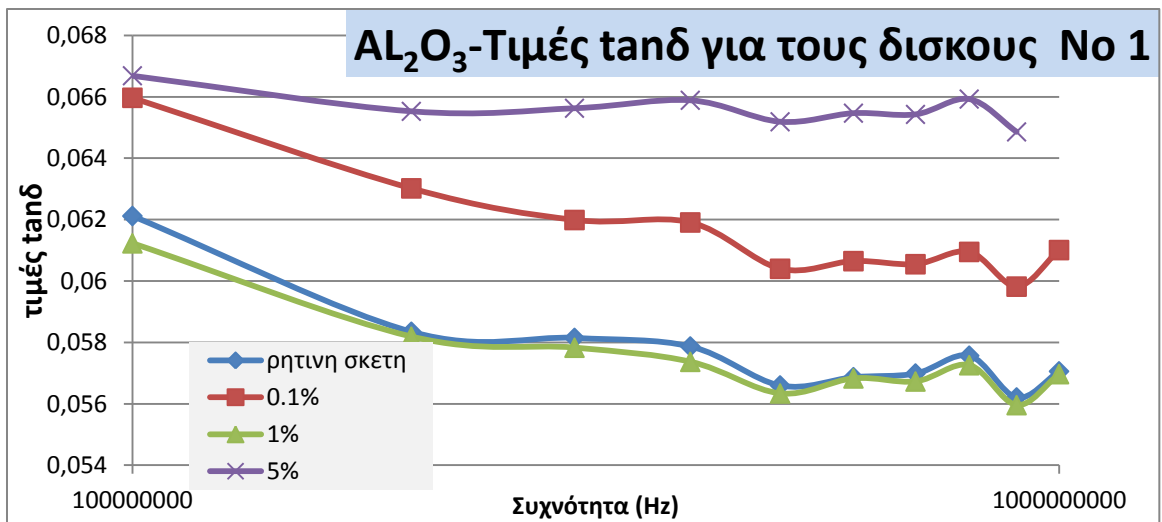
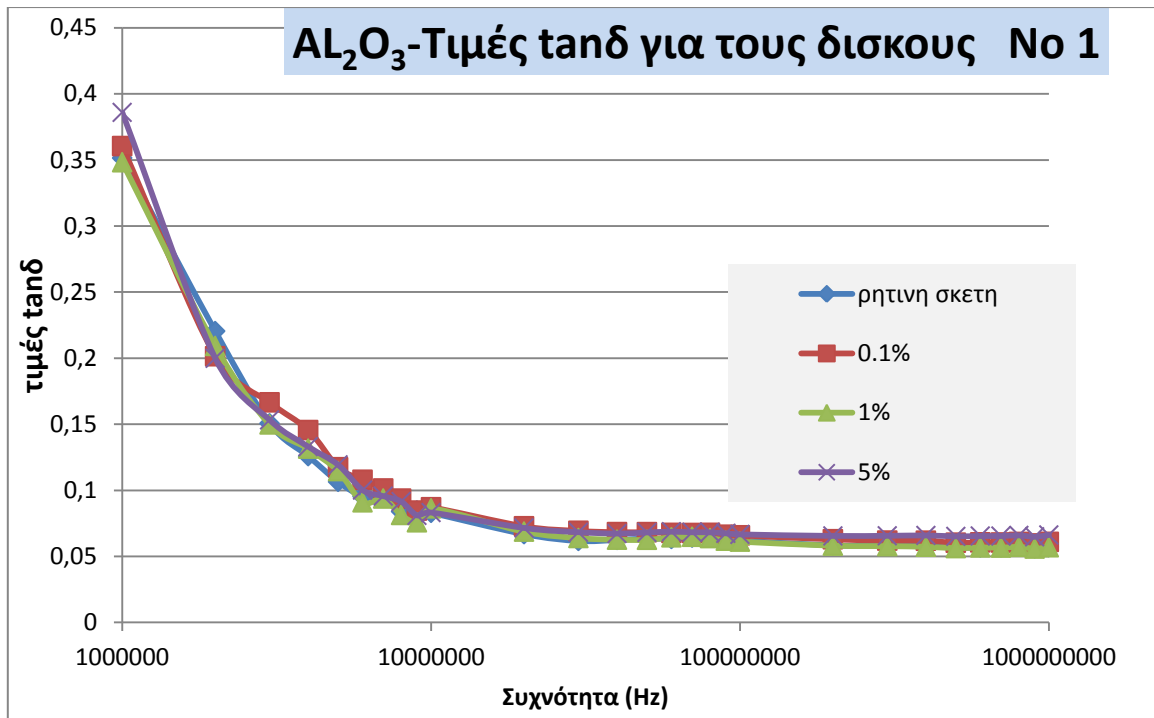
Η εφαπτομένη απωλειών στις πρόσμιξεις με Al_2O_3

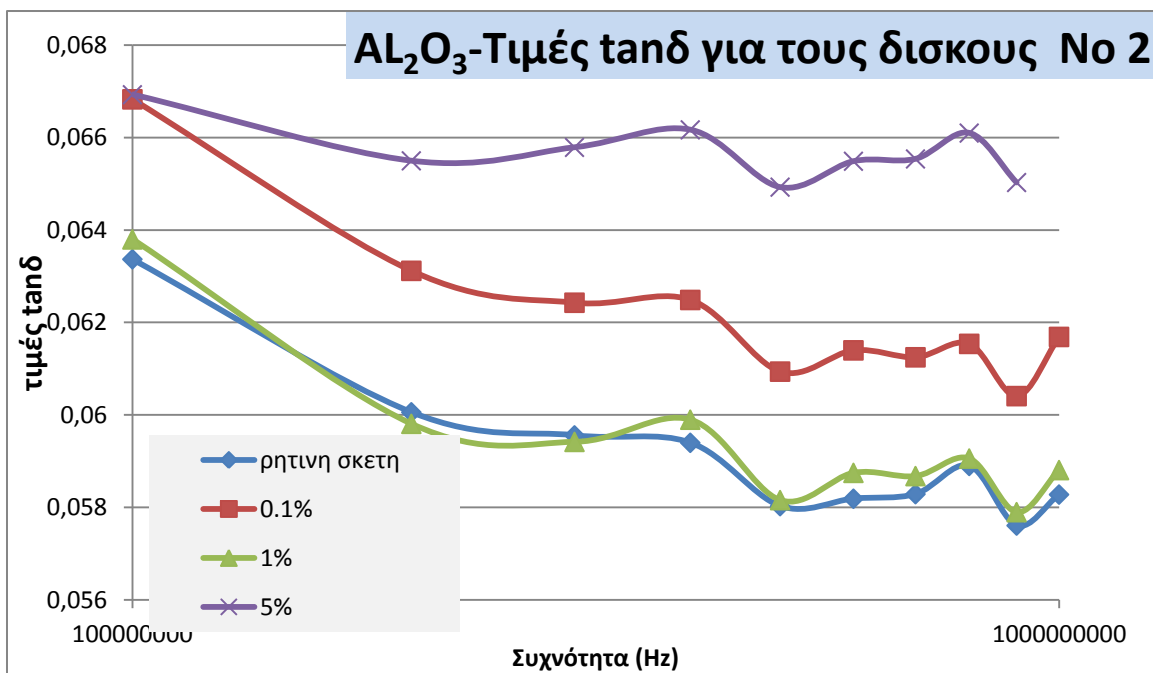
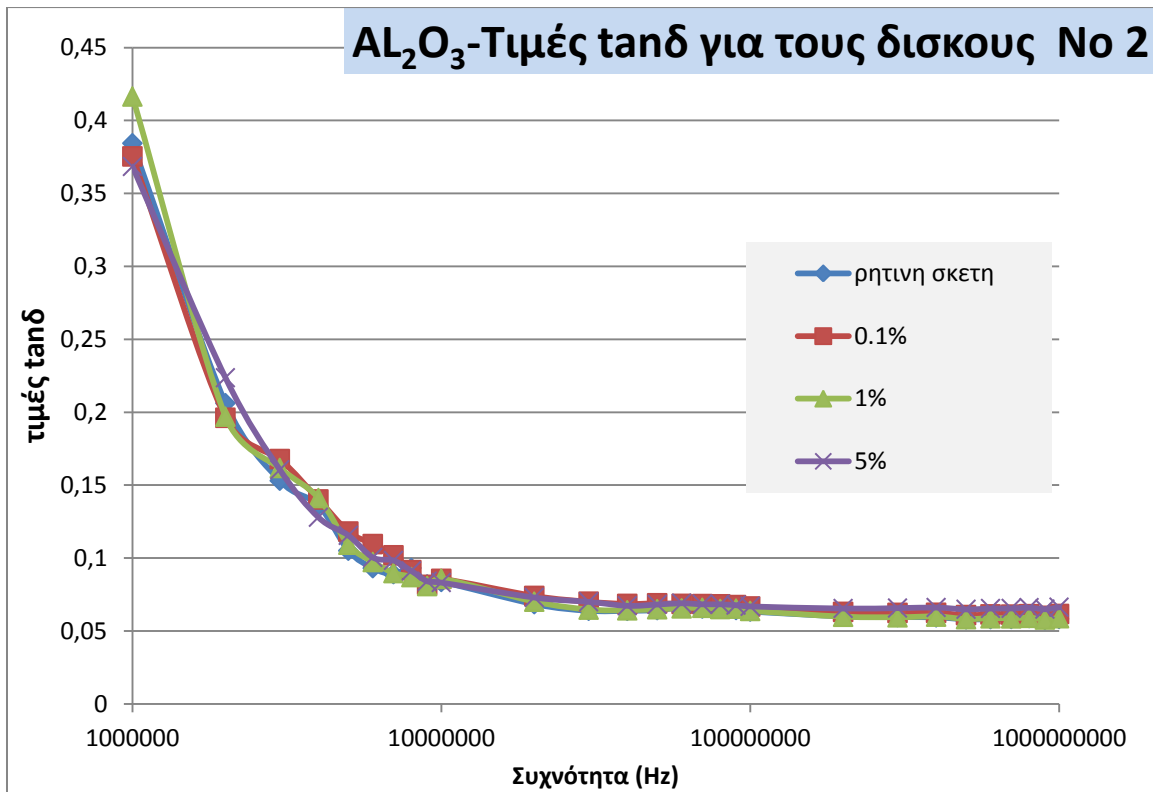
Για τις τιμές της εφαπτομένης απωλειών για τις διάφορους δίσκους, προκύπτουν τα γραφήματα που ακολουθούν παρακάτω. Ωστόσο προκειμένου να παρουσιαστεί καλύτερα η διασπορά της τιμής της εφαπτομένης απωλειών των διαφόρων συγκεντρώσεων, επιλέχθηκε να παρουσιάζονται α αποτελέσματα και σε μικρότερο εύρος συχνοτήτων, αυτό των 100 MHz έως 1GHz .

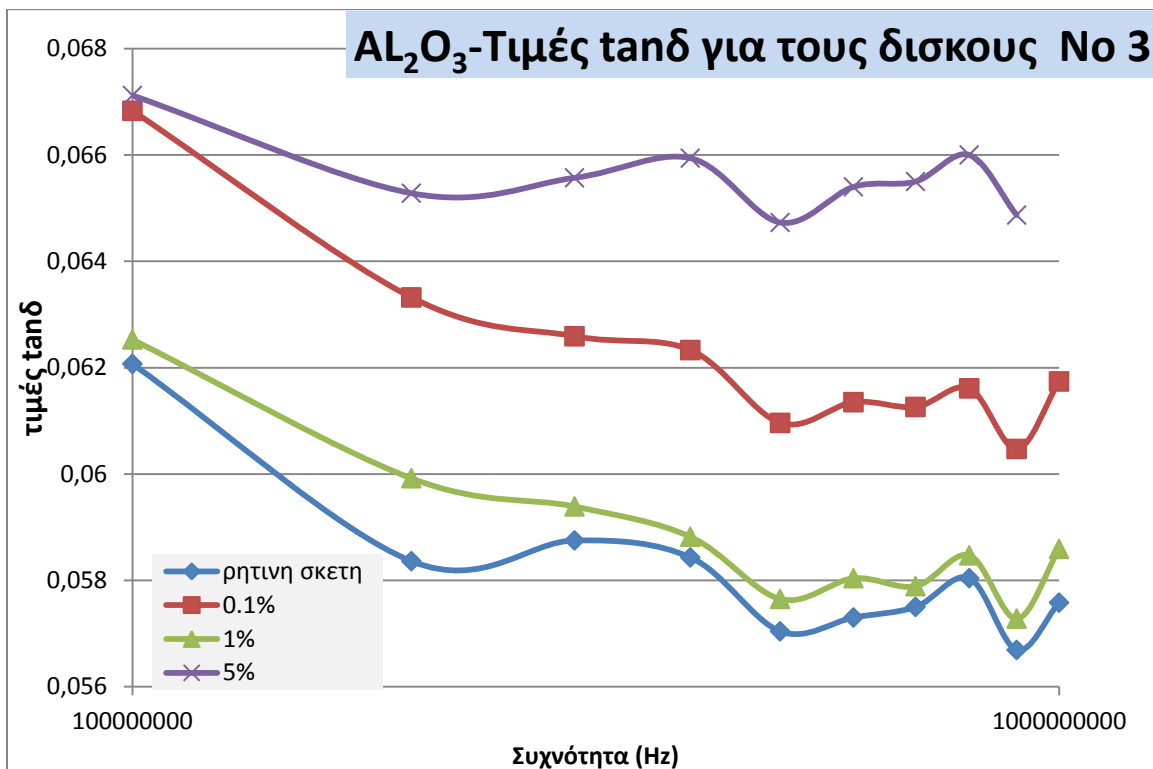
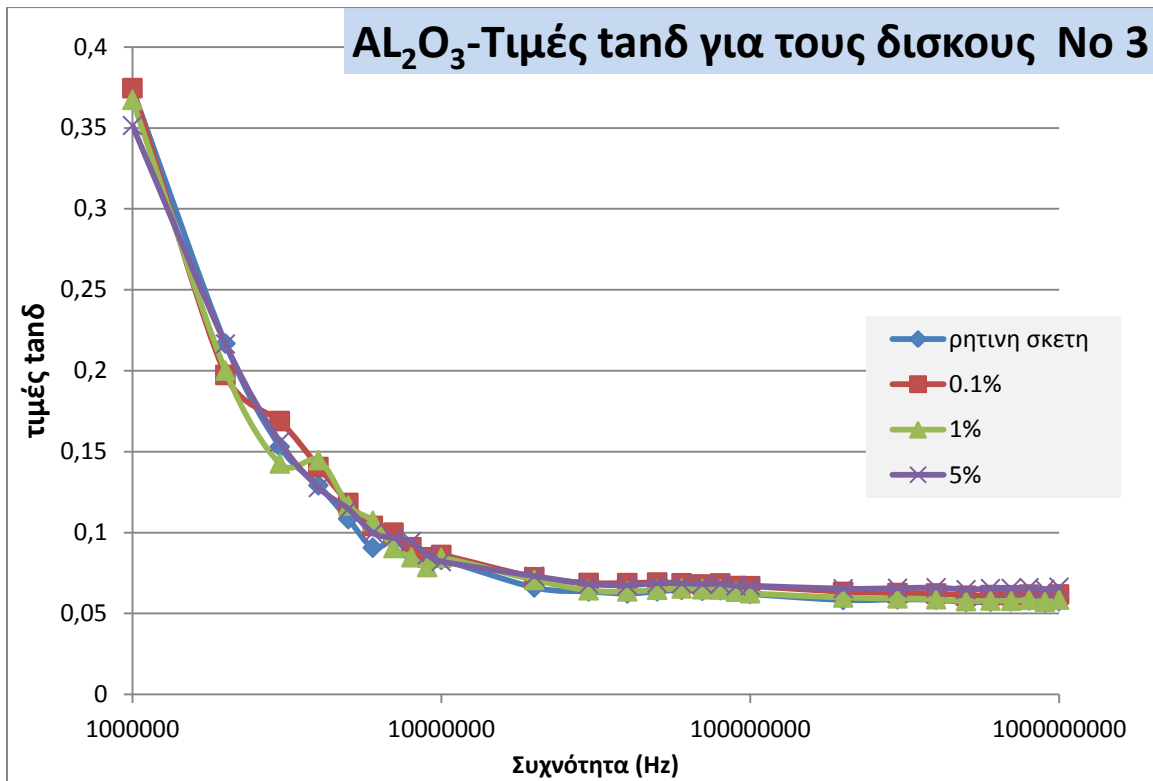
Στον συγκεντρωτικό πίνακα με τις απεικονίσεις που παρουσιάζεται επίσης παρακάτω, για εύρος συχνοτήτων από 100 MHz έως 1GHz, φαίνεται πως η τιμή της εφαπτομένης απωλειών είναι ανεξάρτητη από τον αριθμό του δίσκου (δηλαδή από την απόσταση από την επιφάνεια του δοκιμίου) άλλα να εξαρτάται μόνο από την συγκέντρωση της πρόσμιξης στην μήτρα της ρητίνης.

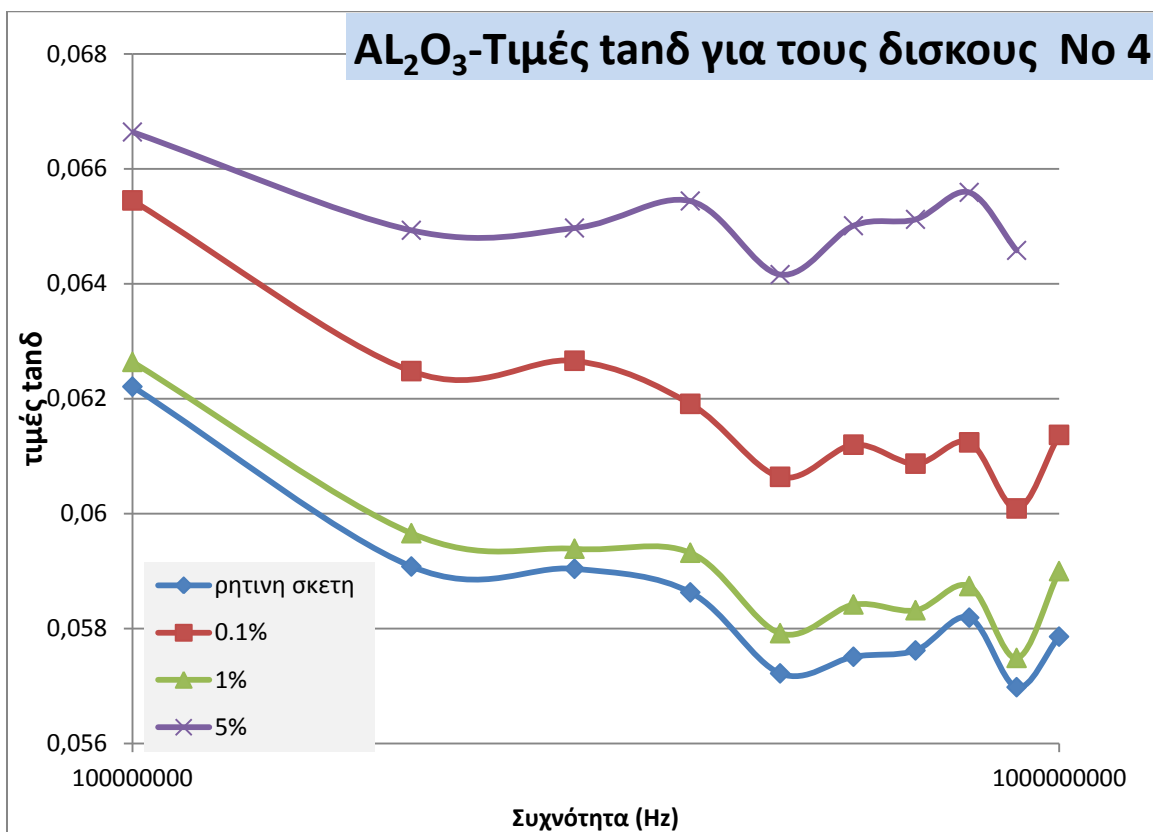
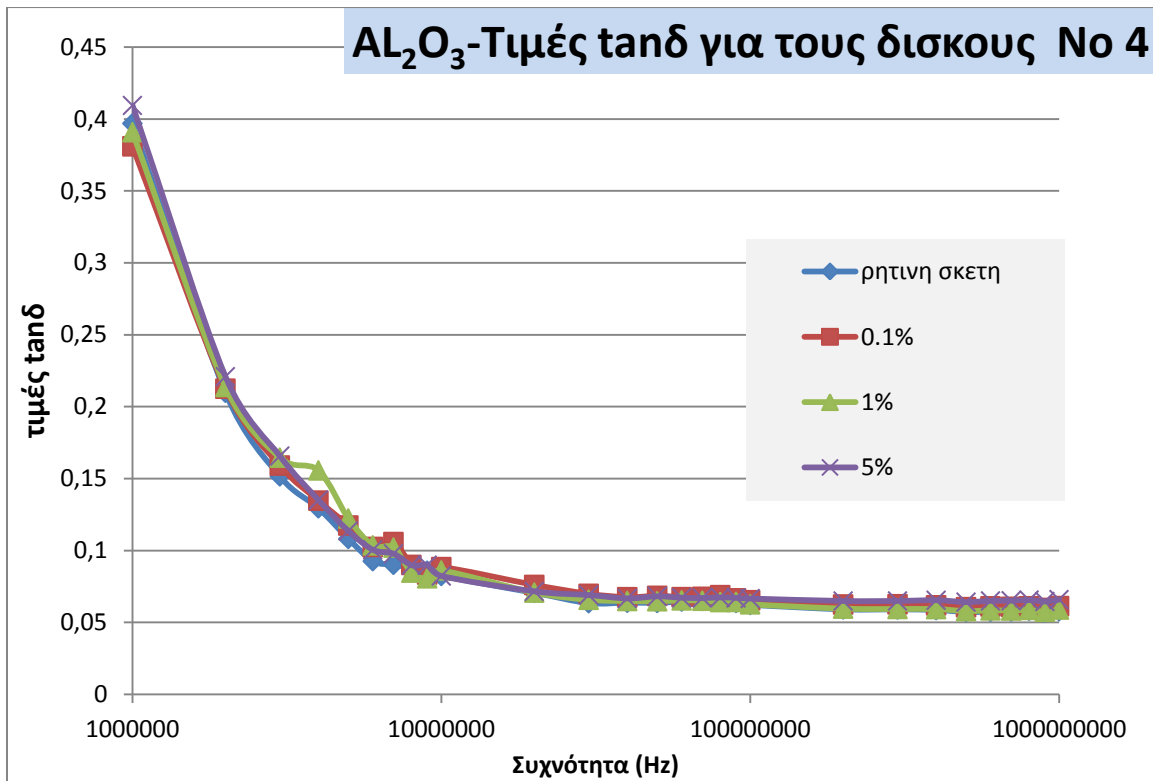
Όσον αφορά στο κατά πόσο επηρεάζει η συγκέντρωση της πρόσμιξης την τιμή της εφαπτομένης, διαπιστώνεται πως δεν ακολουθείται αναλογικός τρόπος μεταβολής με το ποσοστό συγκέντρωσης όπως θα περίμενε κανείς. Έτσι φαίνεται πως στην περίπτωση της συγκέντρωσης του 0,1% έχουμε μεγαλύτερη αύξηση της εφαπτομένης απ' ότι στην συγκέντρωση του 1% (όπου εκεί η καμπύλη της εφαπτομένης φαίνεται να ακολουθεί την καμπύλη της σκέτης ρητίνης). Από την άλλη για την συγκέντρωση του 5% η αύξηση στην τιμή της εφαπτομένης είναι μεγαλύτερη απ όλες τις άλλες συγκεντρώσεις.

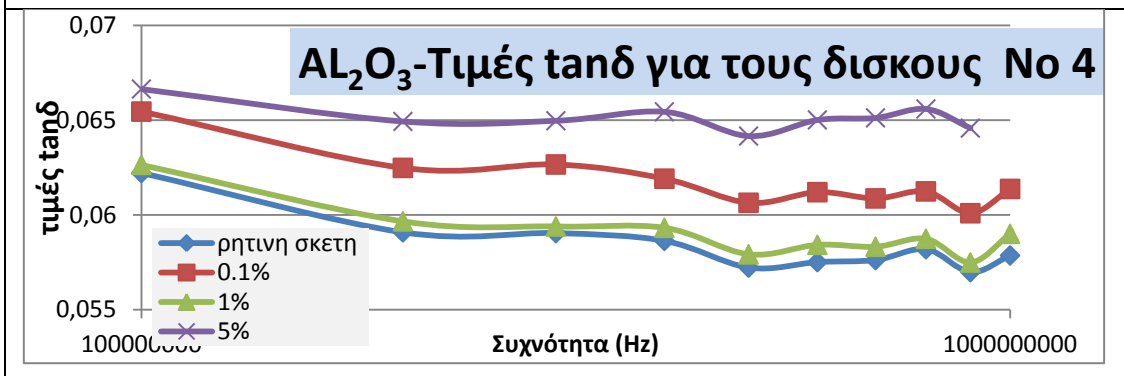
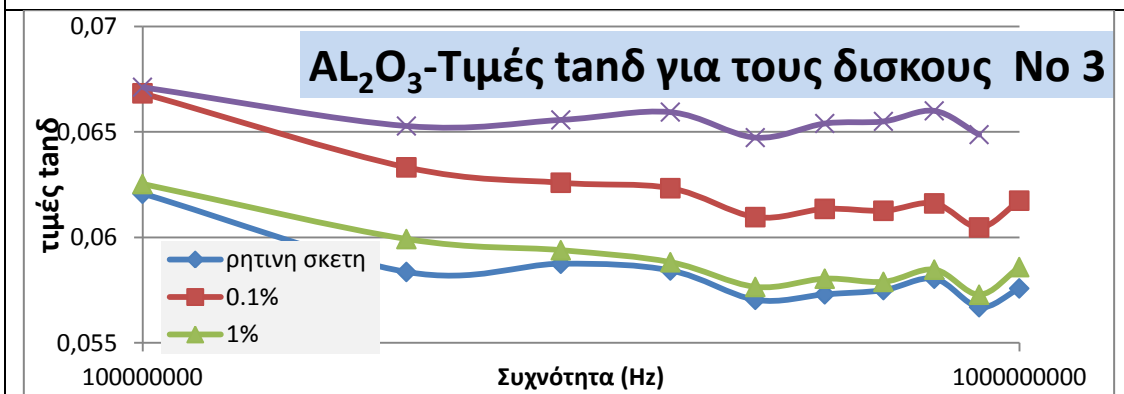
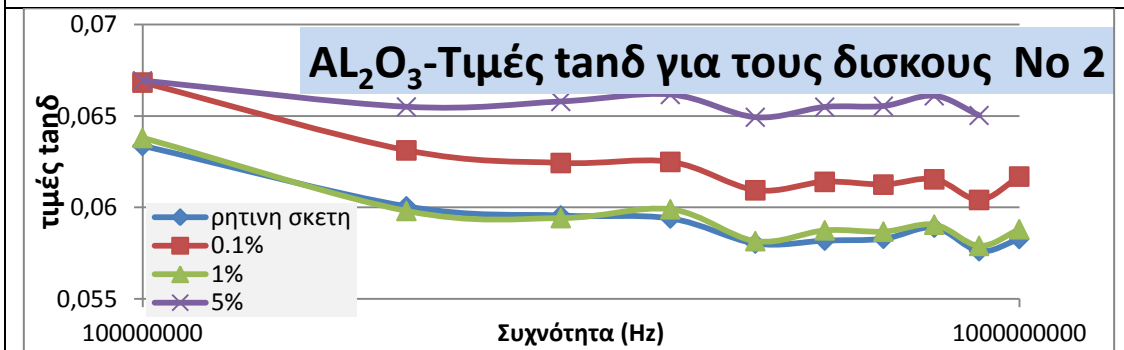
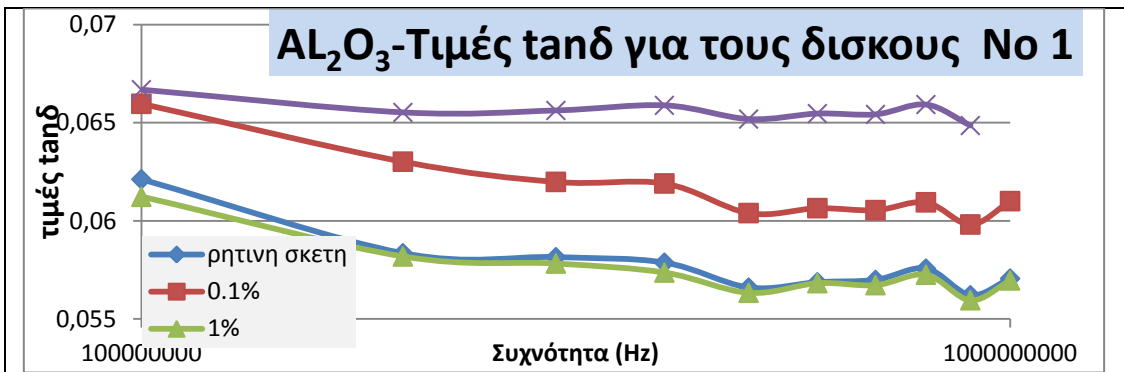
Το παραπάνω συμπέρασμα εξάγεται και εφ' όσον επιλέξουμε να παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα ως προς τον μέσο όρο της τιμής της εφαπτομένης όλων των δίσκων για την κάθε μια συγκέντρωση, όπως φαίνεται και αυτό στις παραστάσεις που ακολουθούν.

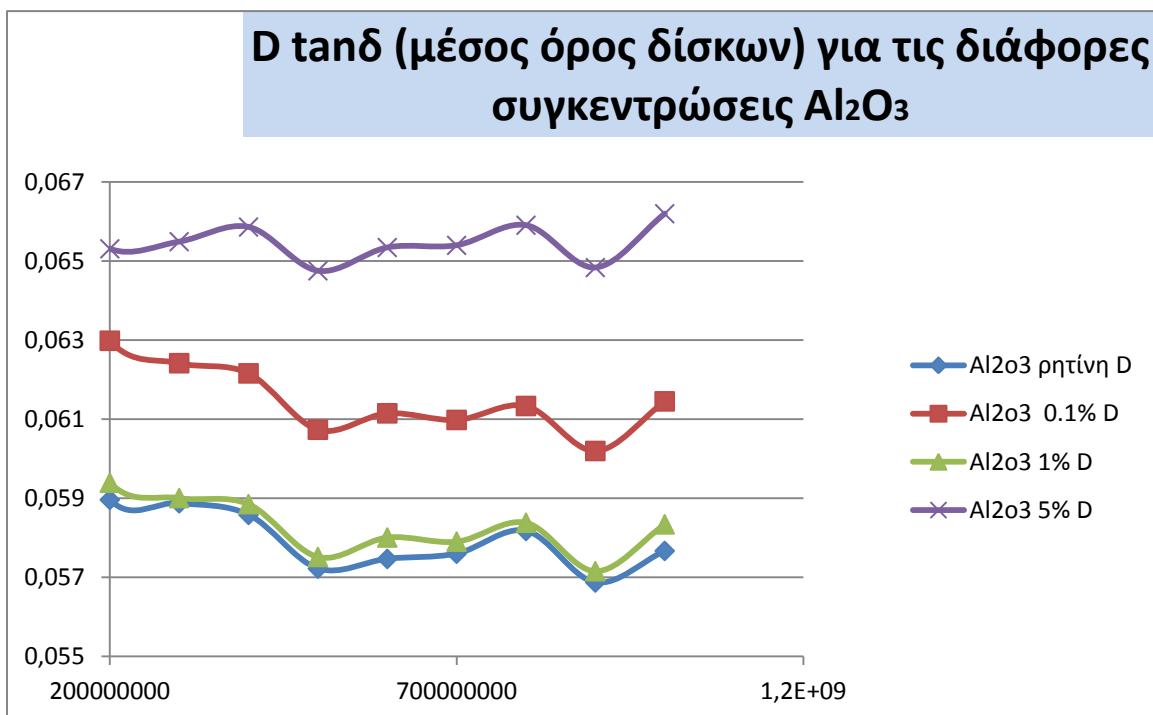
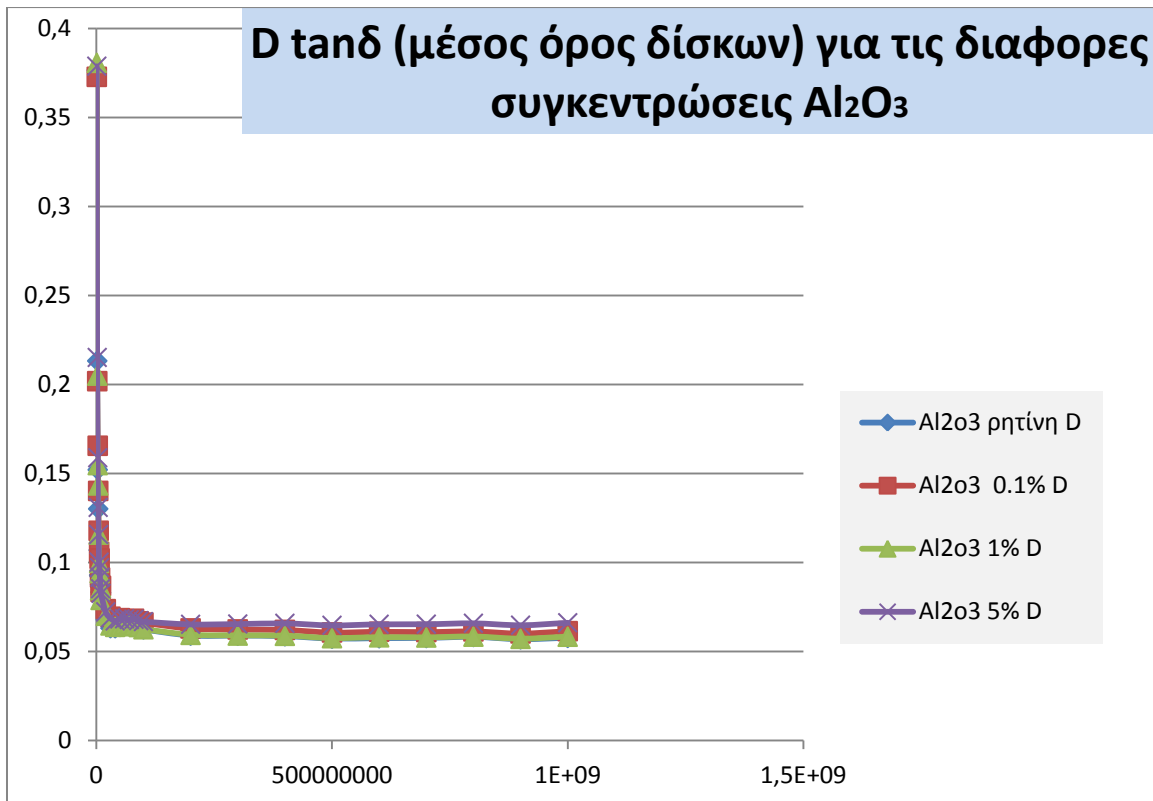






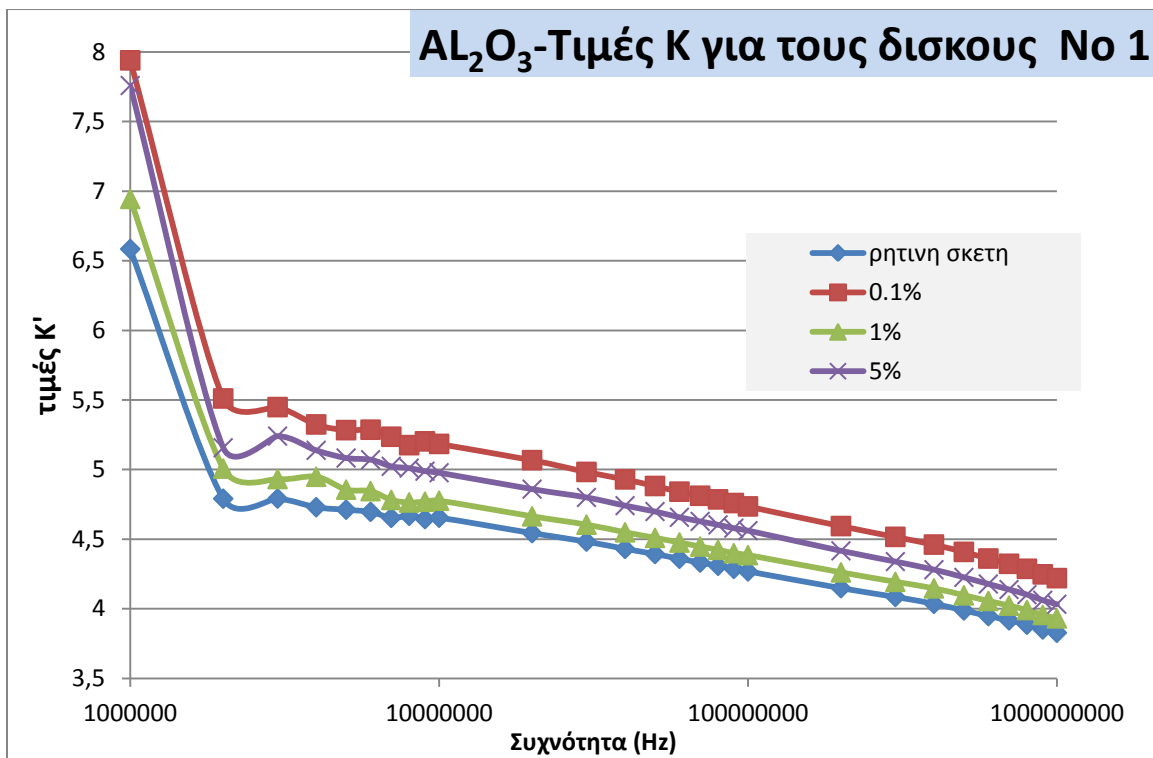


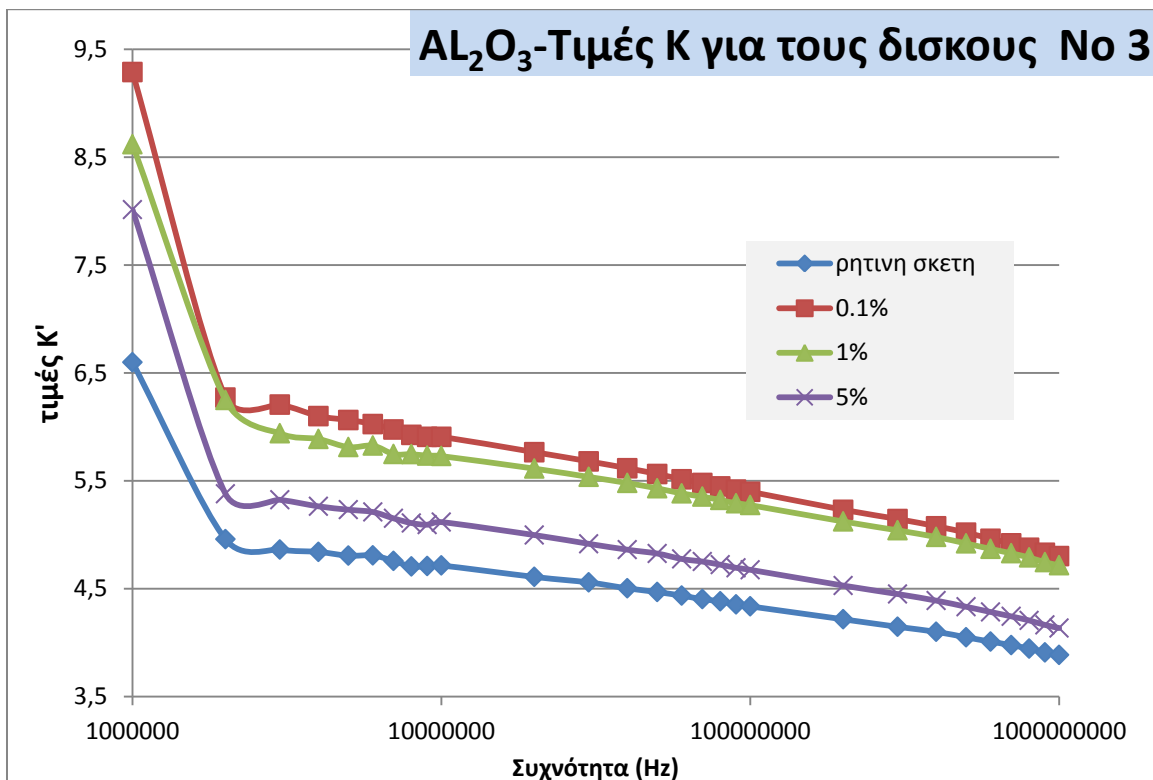
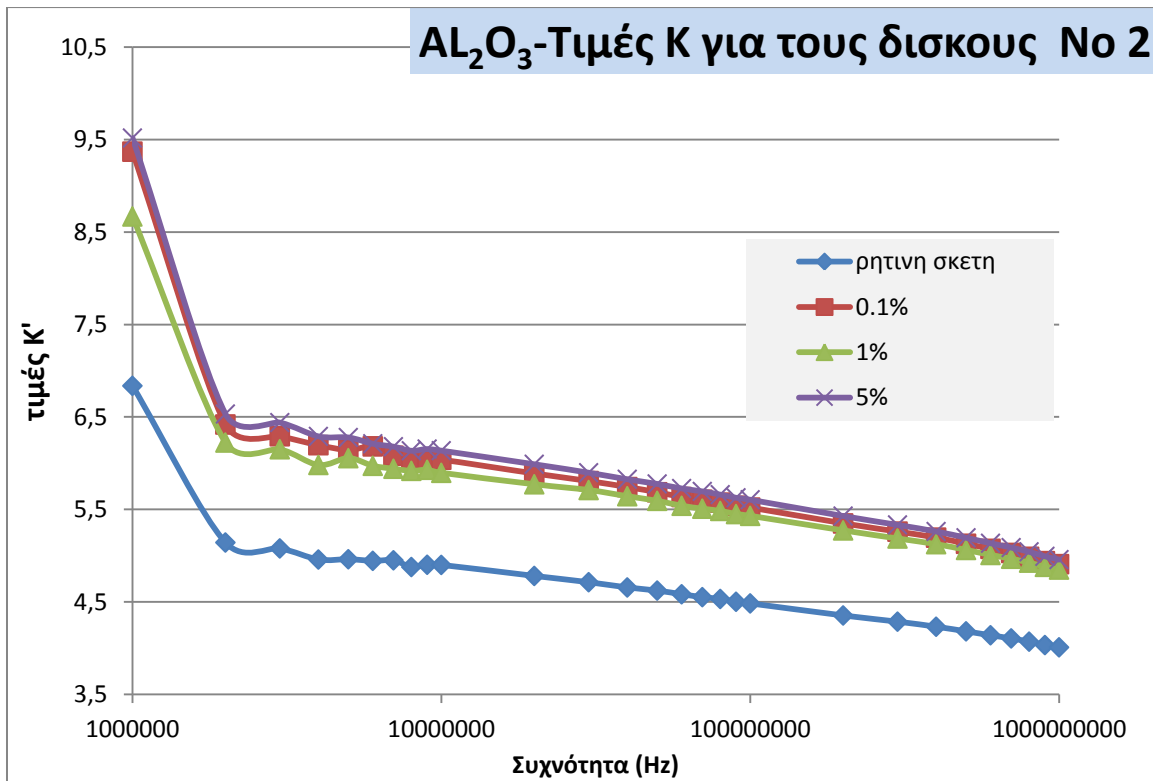


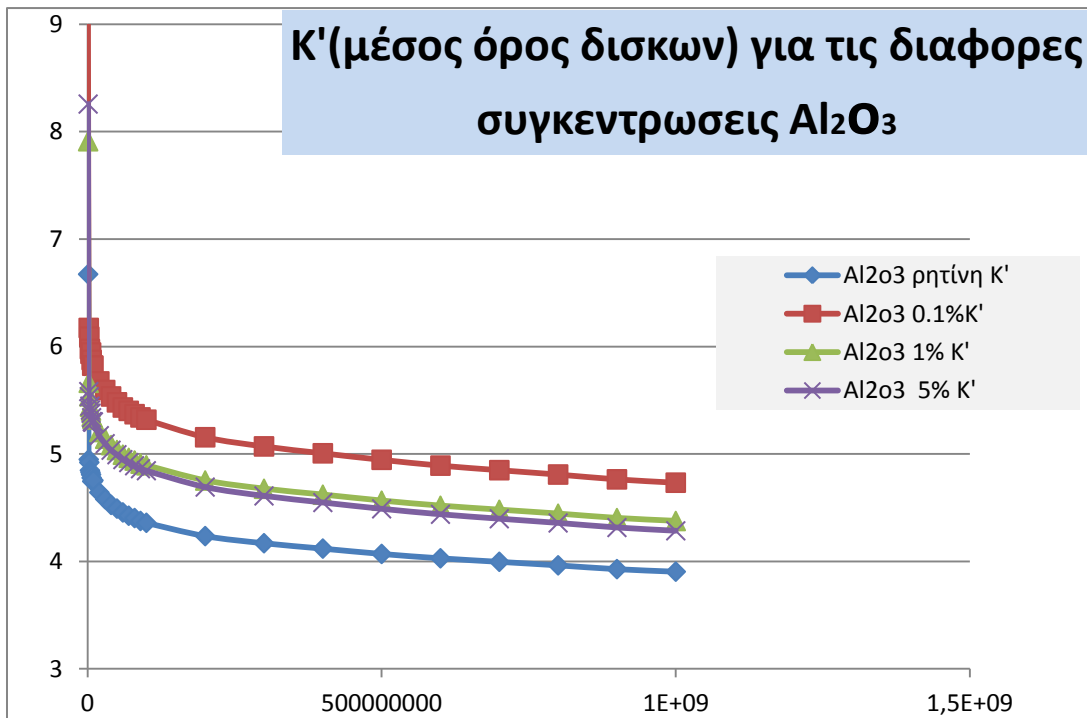
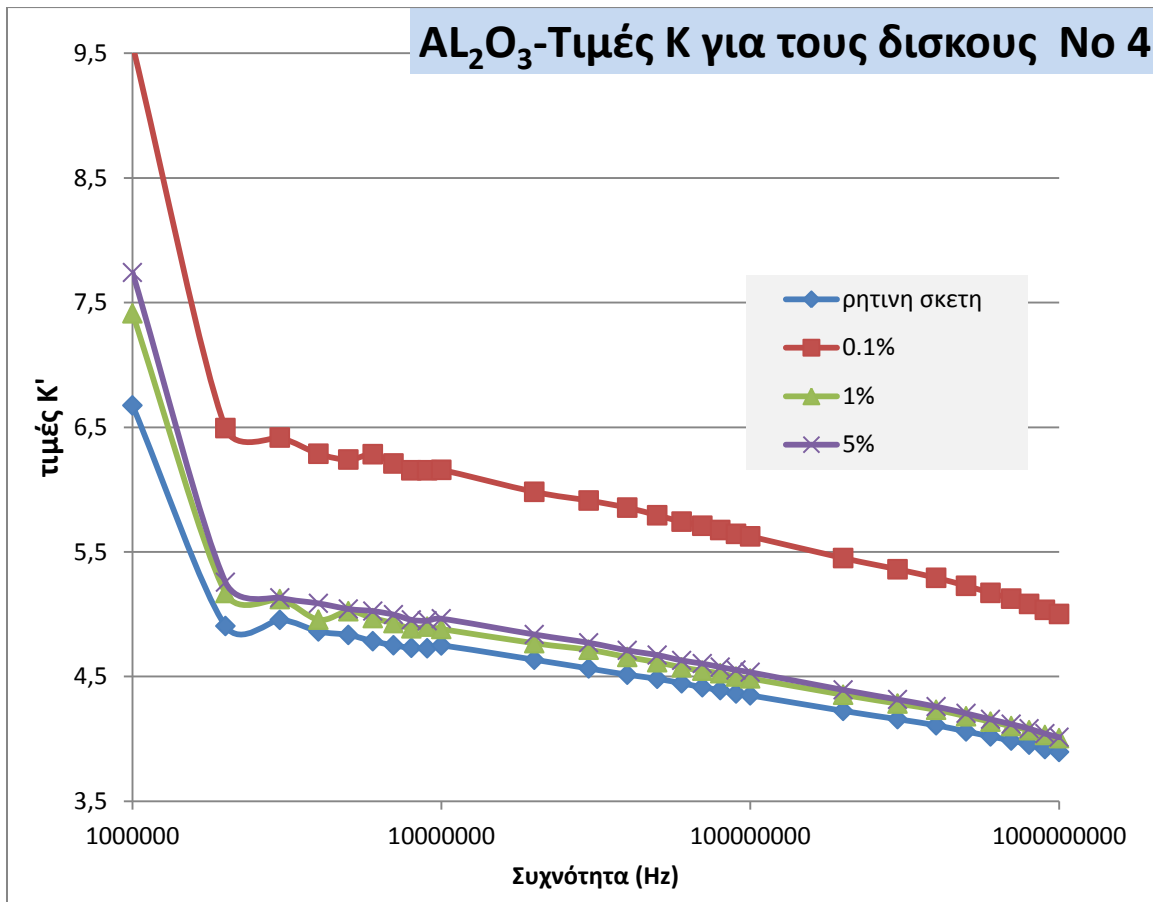


Η διηλεκτρική σταθερά k' στις προσμίξεις με Al_2O_3

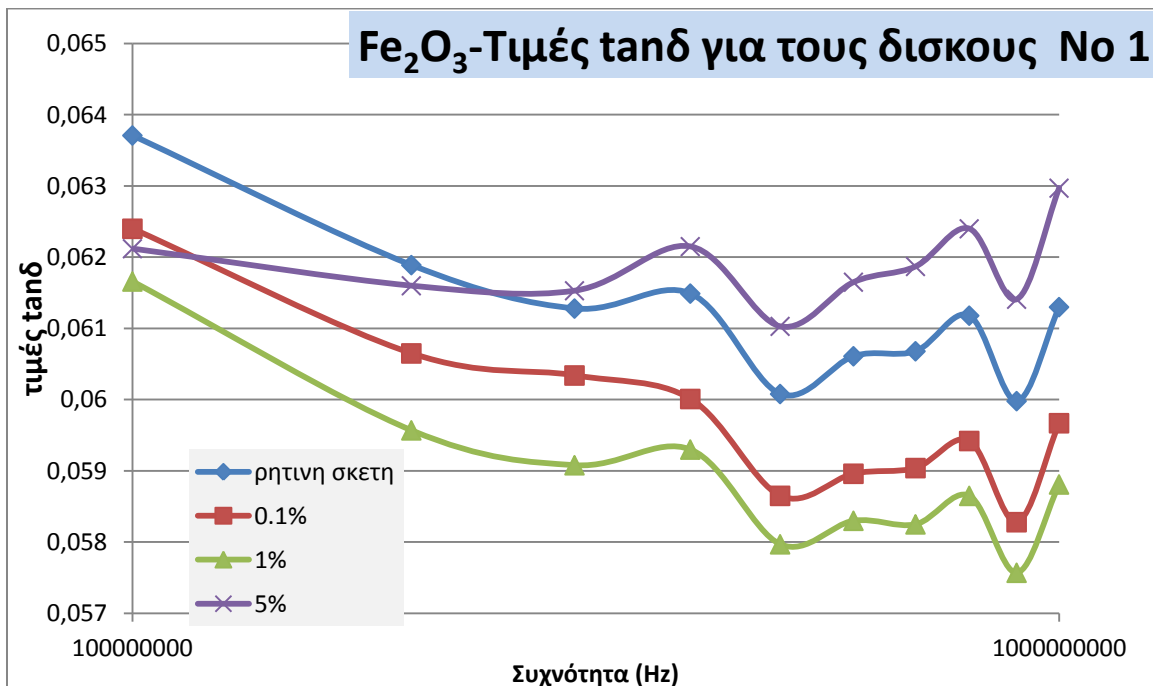
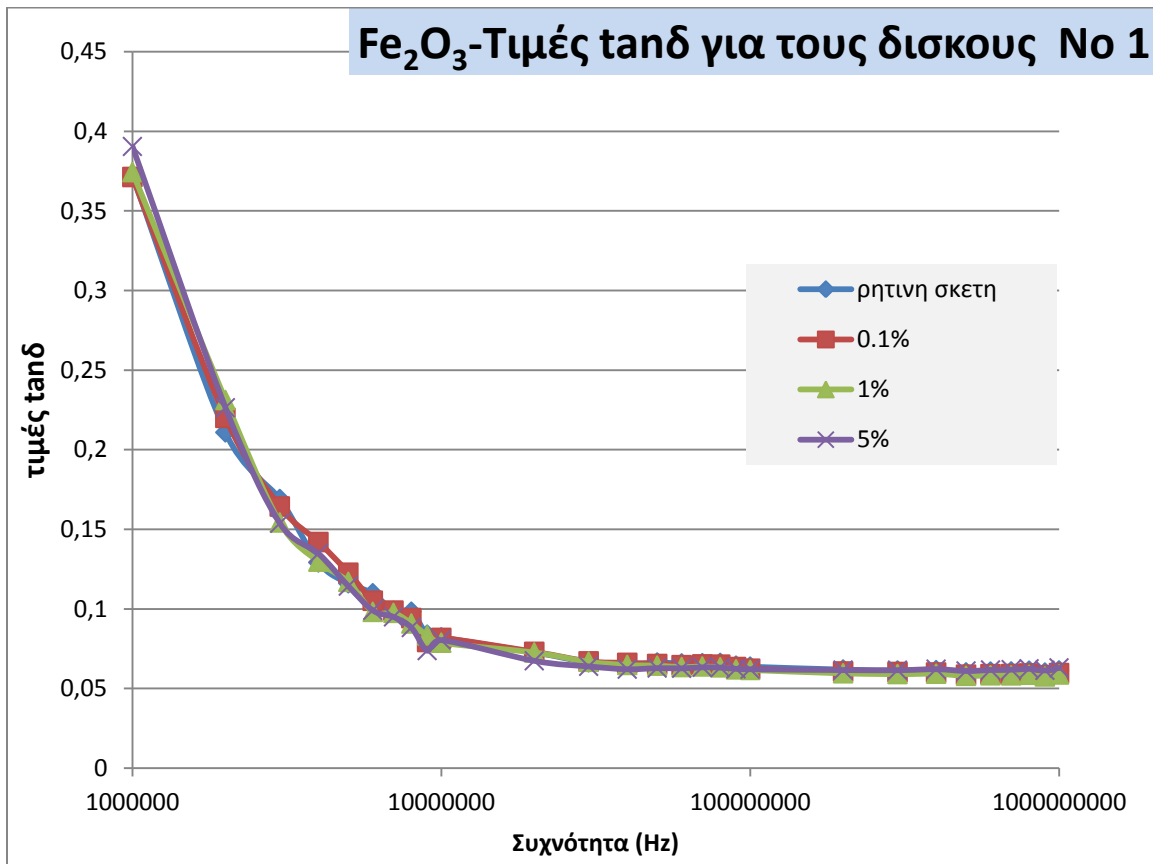
Για την διηλεκτρική σταθερά k' ακολουθείται η ίδια λογική παρουσίασης των αποτελεσμάτων όπως και με την εφαπτόμενη απωλειών. Εδώ φαίνεται η διηλεκτρική σταθερά να επηρεάζεται από τον αριθμό του δίσκου άρα και της απόστασης από την επιφάνεια του δοκιμίου, γιατί παρατηρείται σε κάθε δίσκο να επηρεάζεται η k' με διαφορετικό τρόπο. Επίσης η k' εξαρτάται από την συγκέντρωση της πρόσμιξης αλλά όχι με αναλογικό τρόπο.

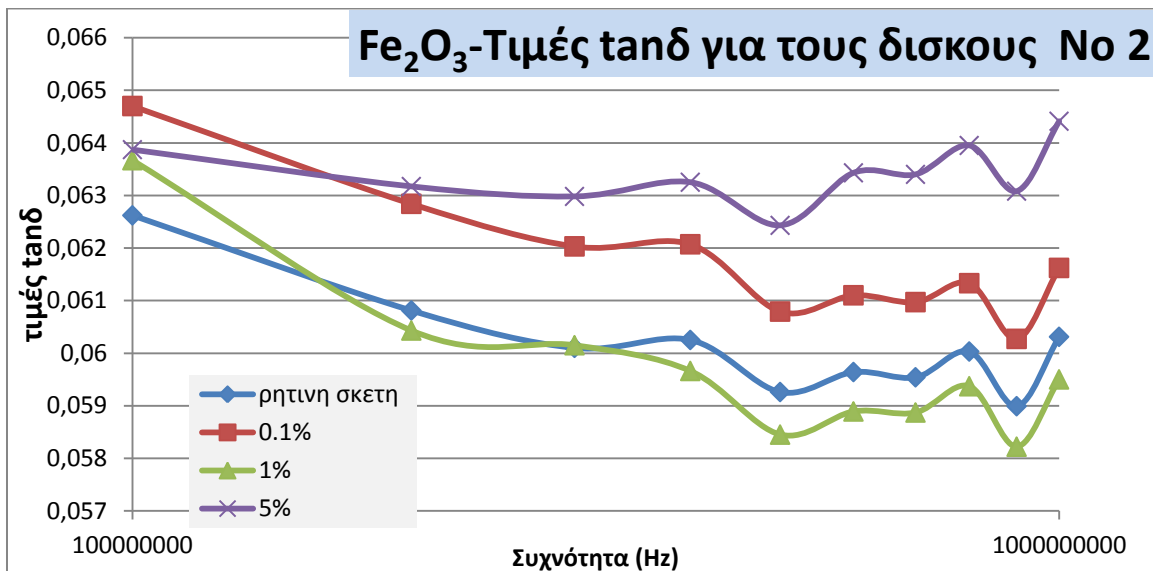
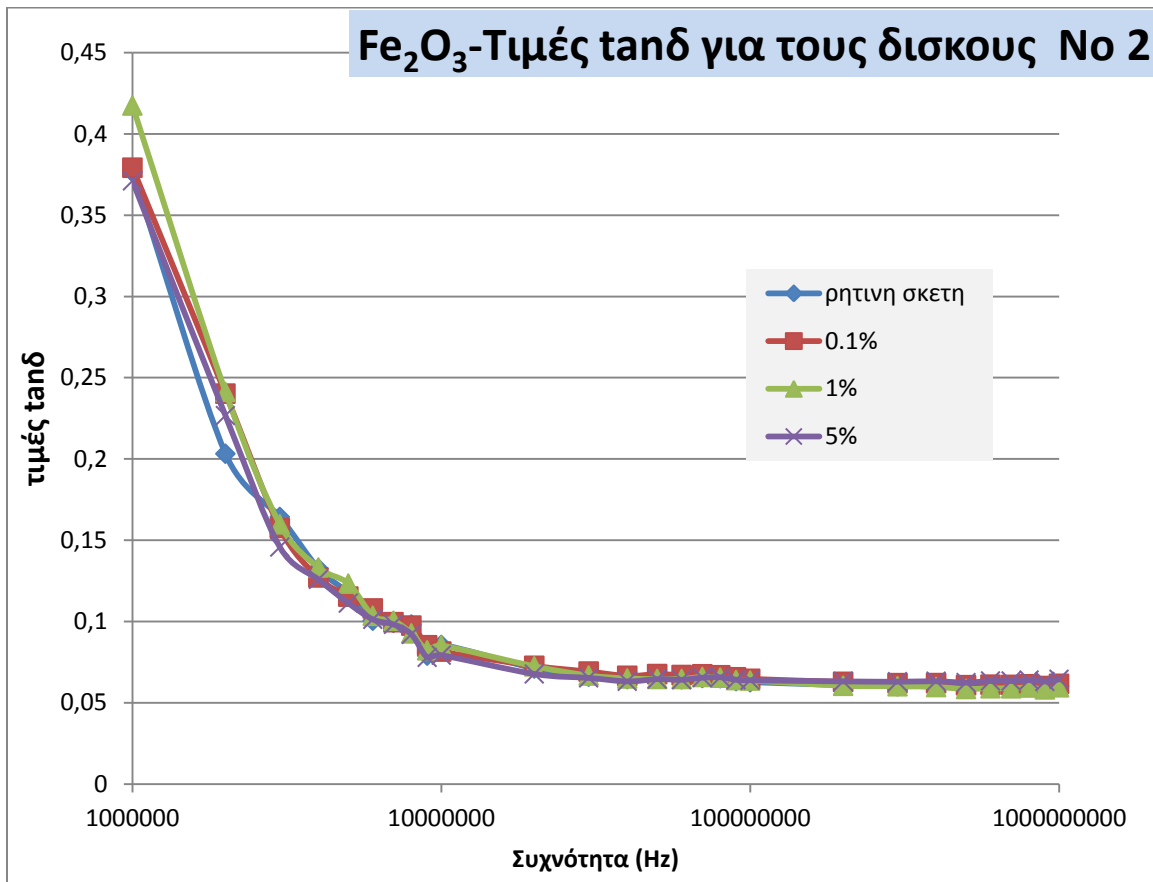


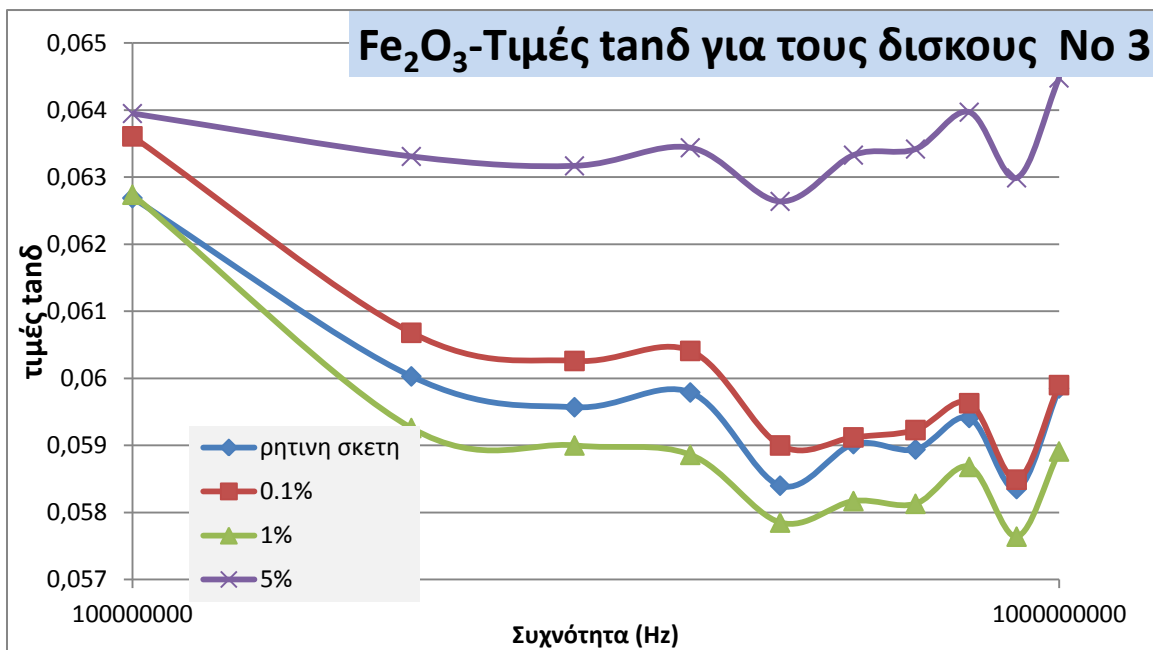
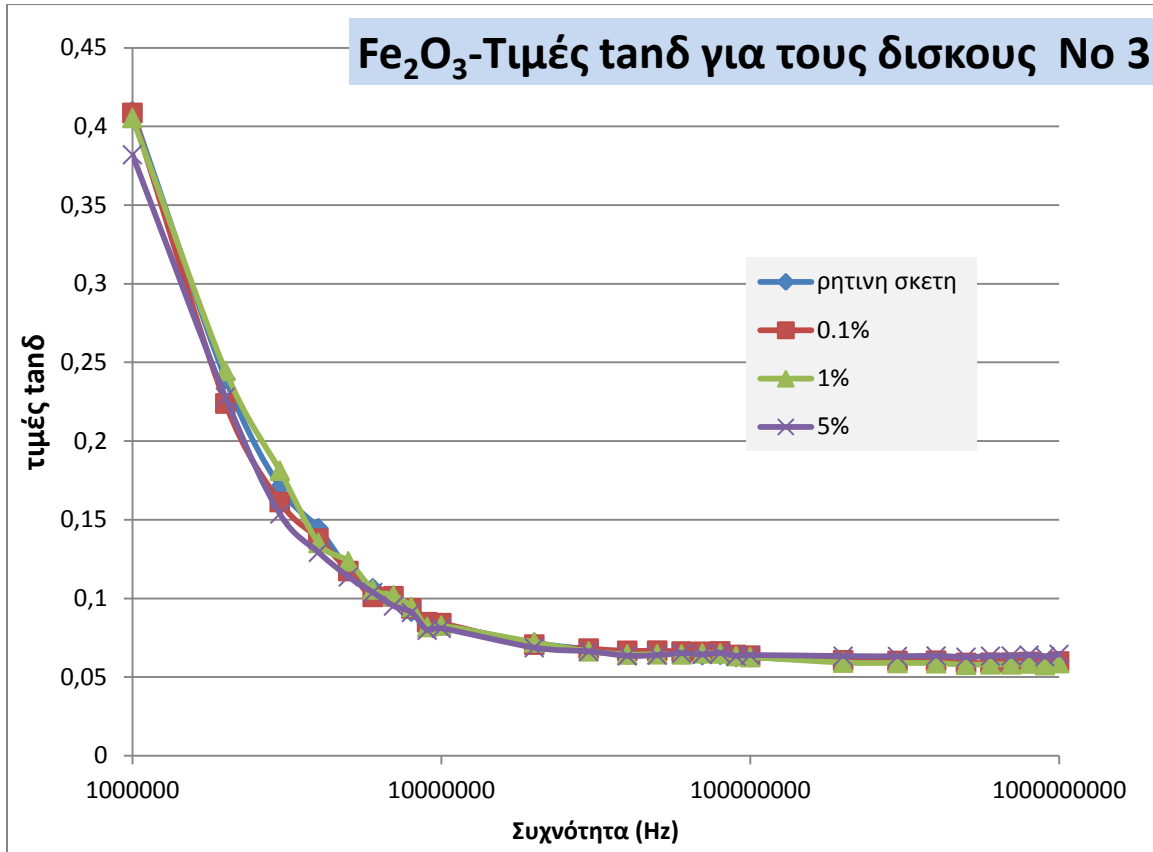


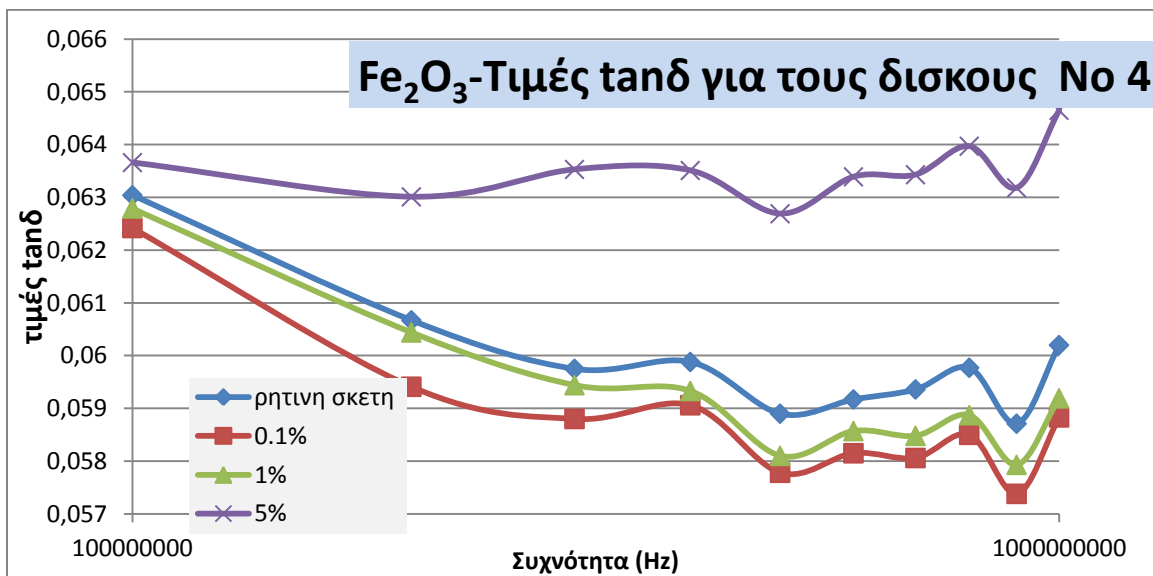
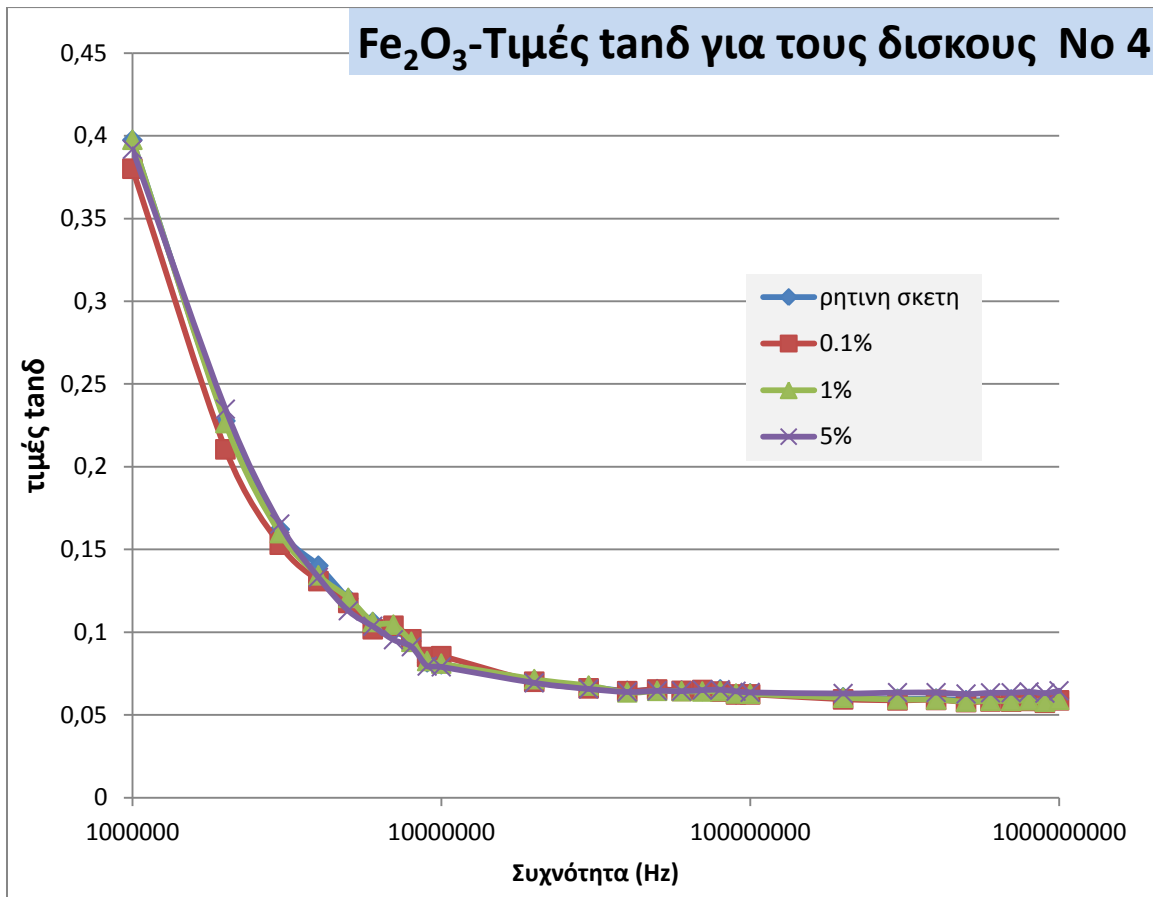


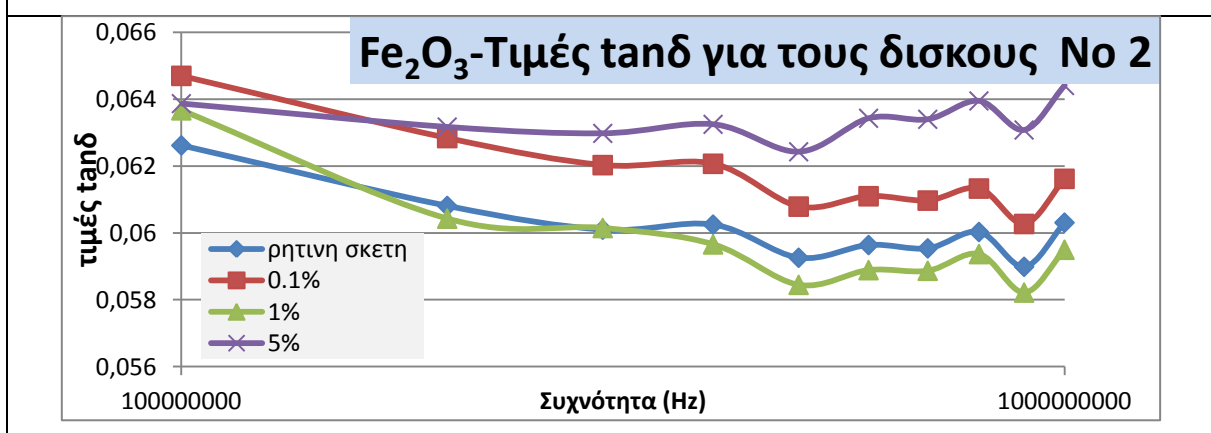
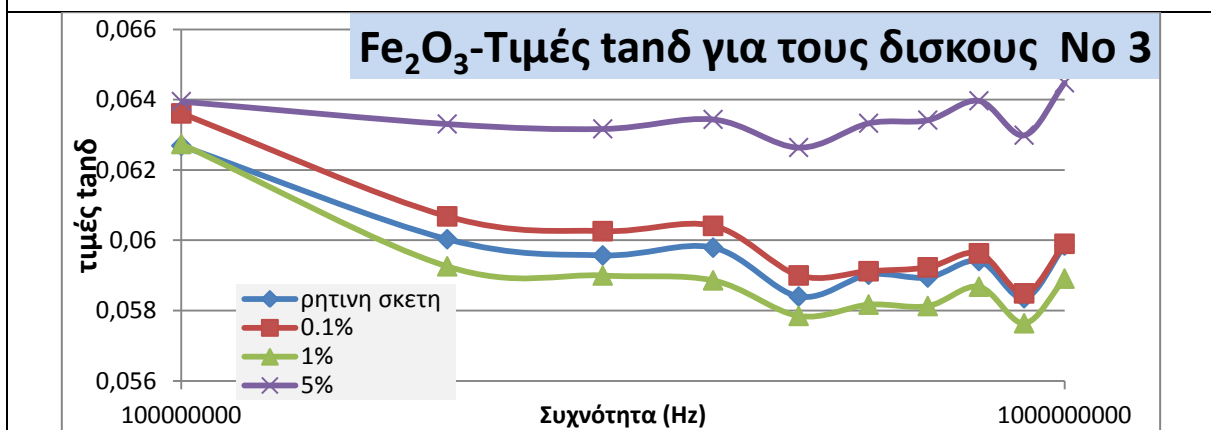
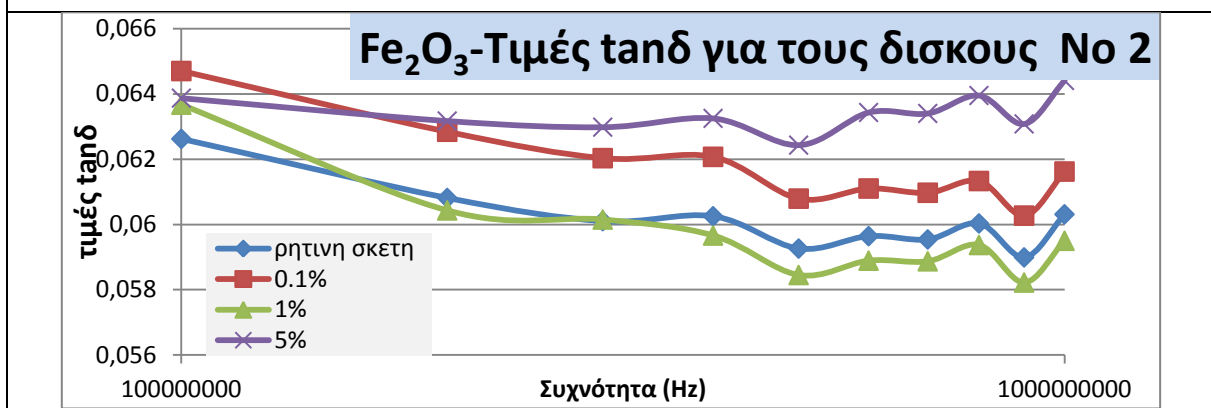
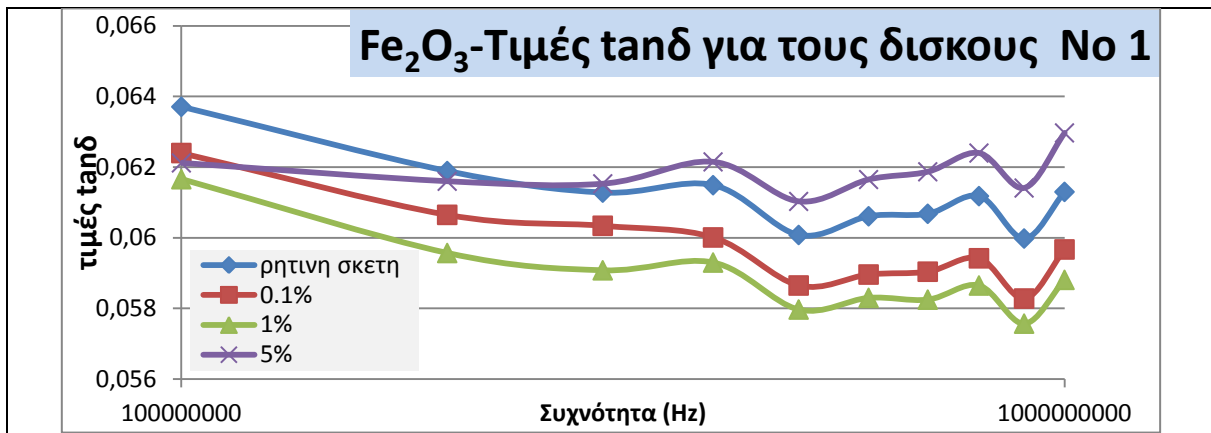
Η εφραπτομένη απωλειών στις προσμίξεις με Fe_2O_3

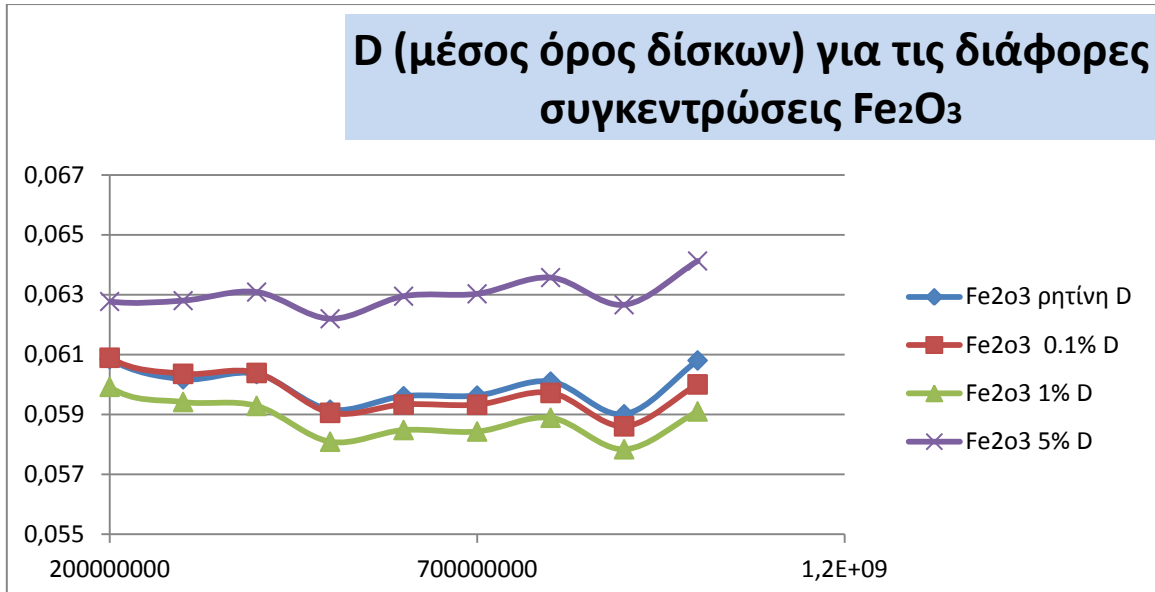




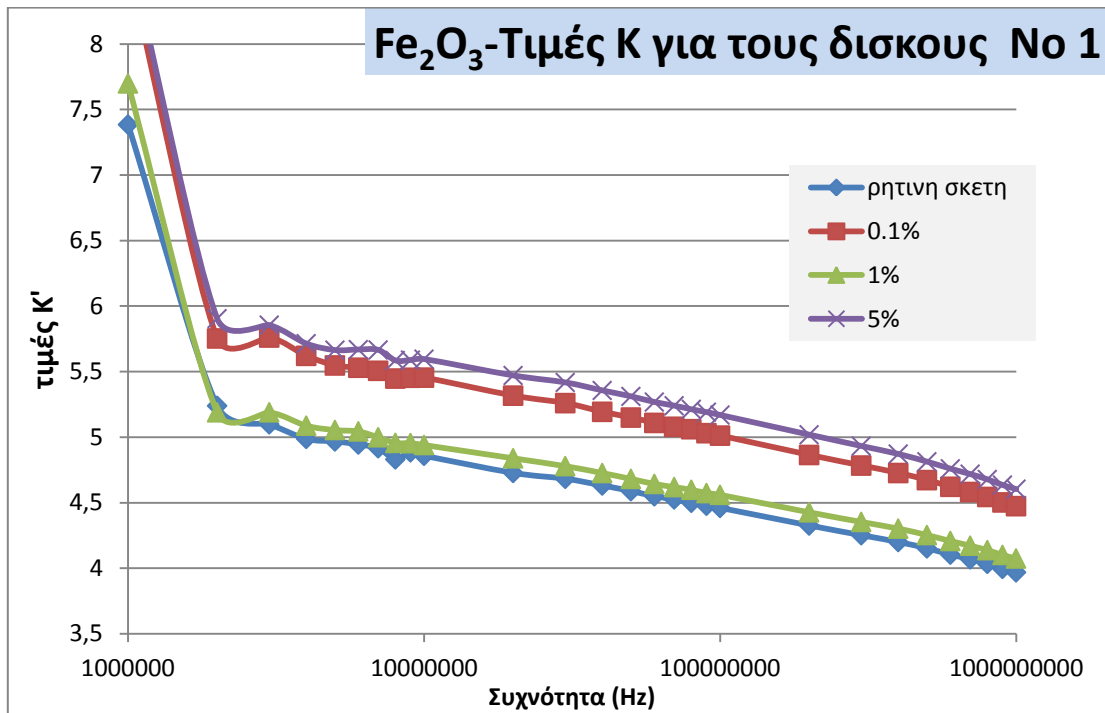


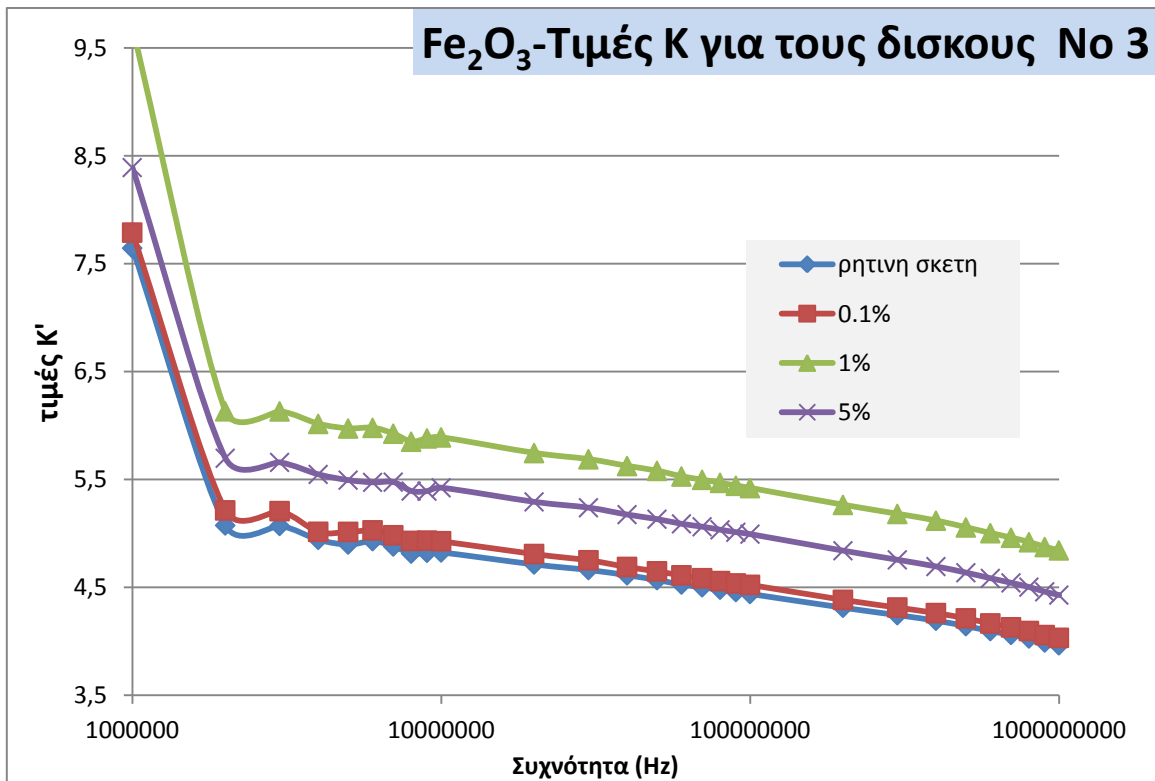
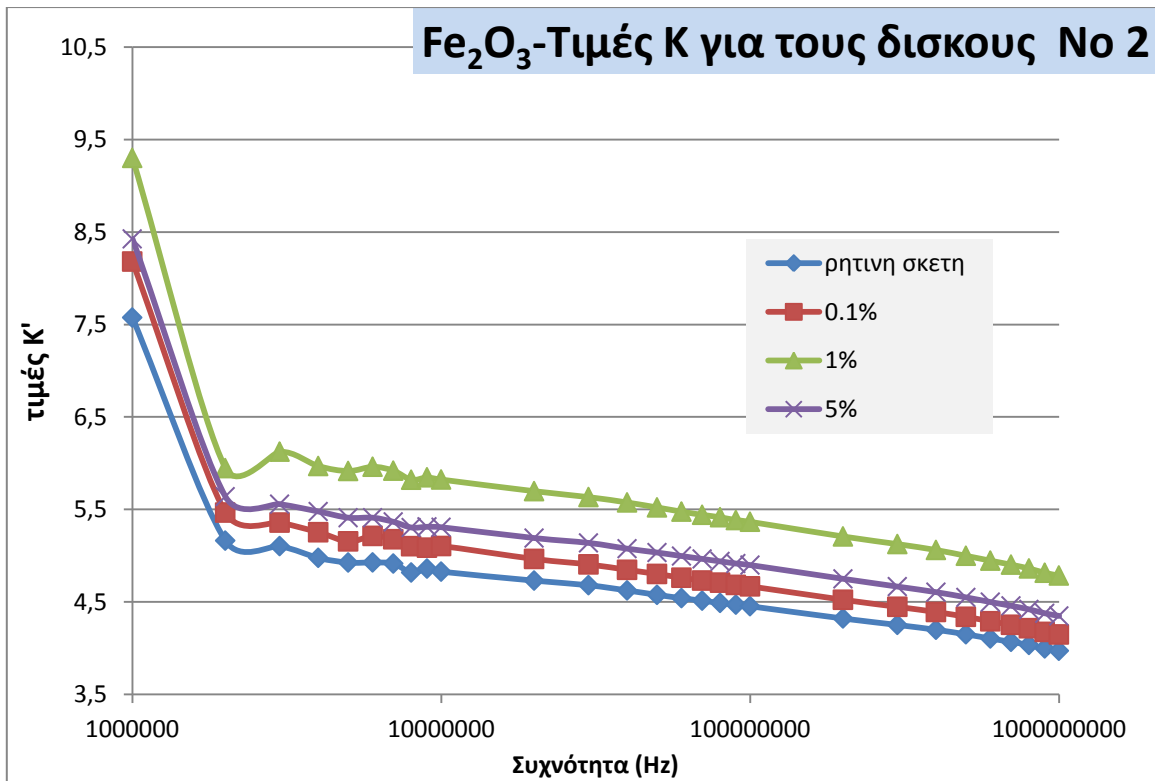


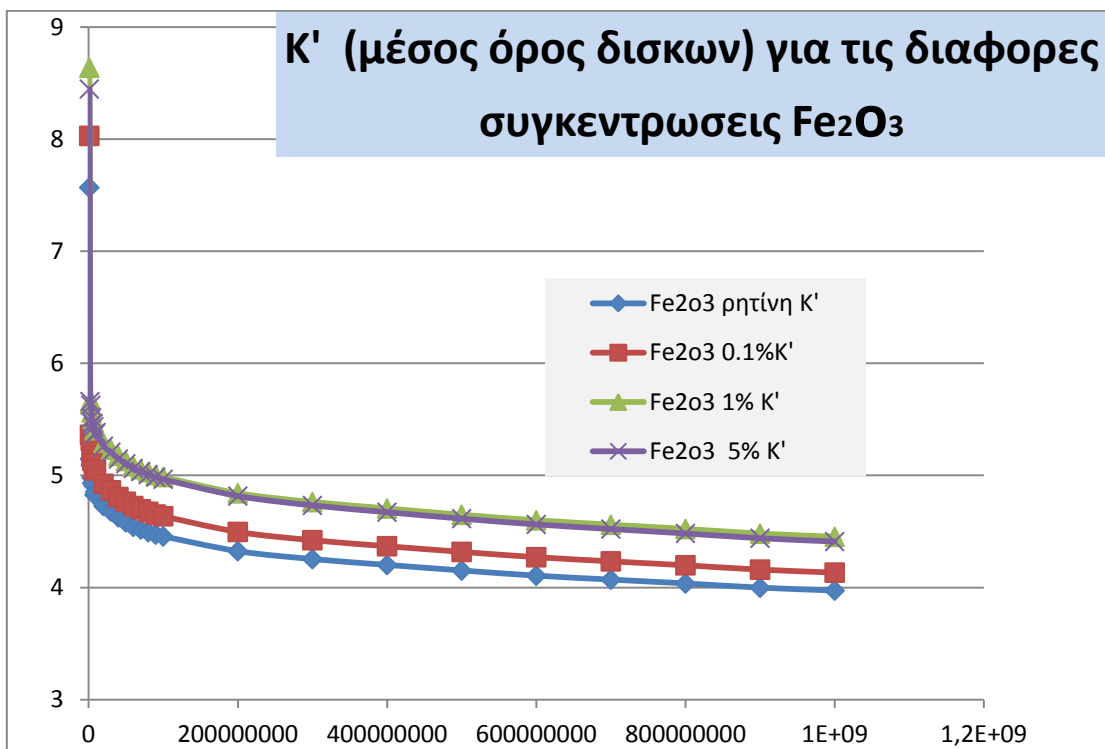
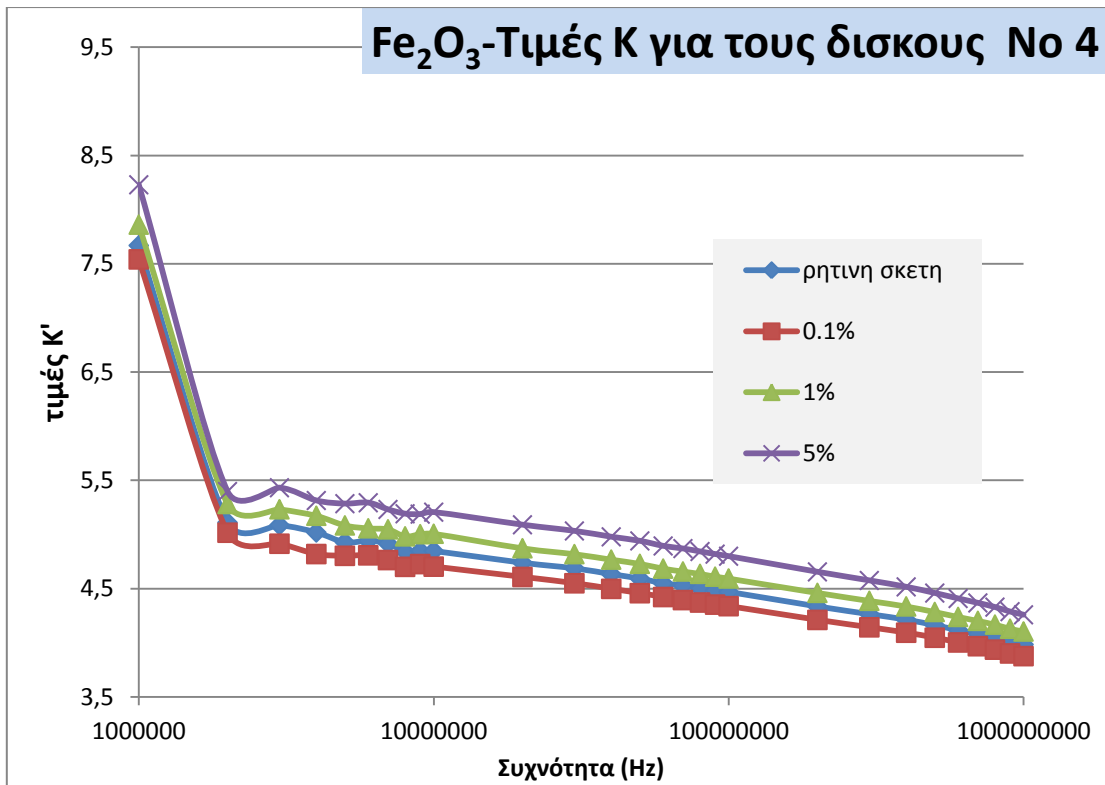




Η διηλεκτρική σταθερά κ' στις προσμίξεις με Fe₂O₃

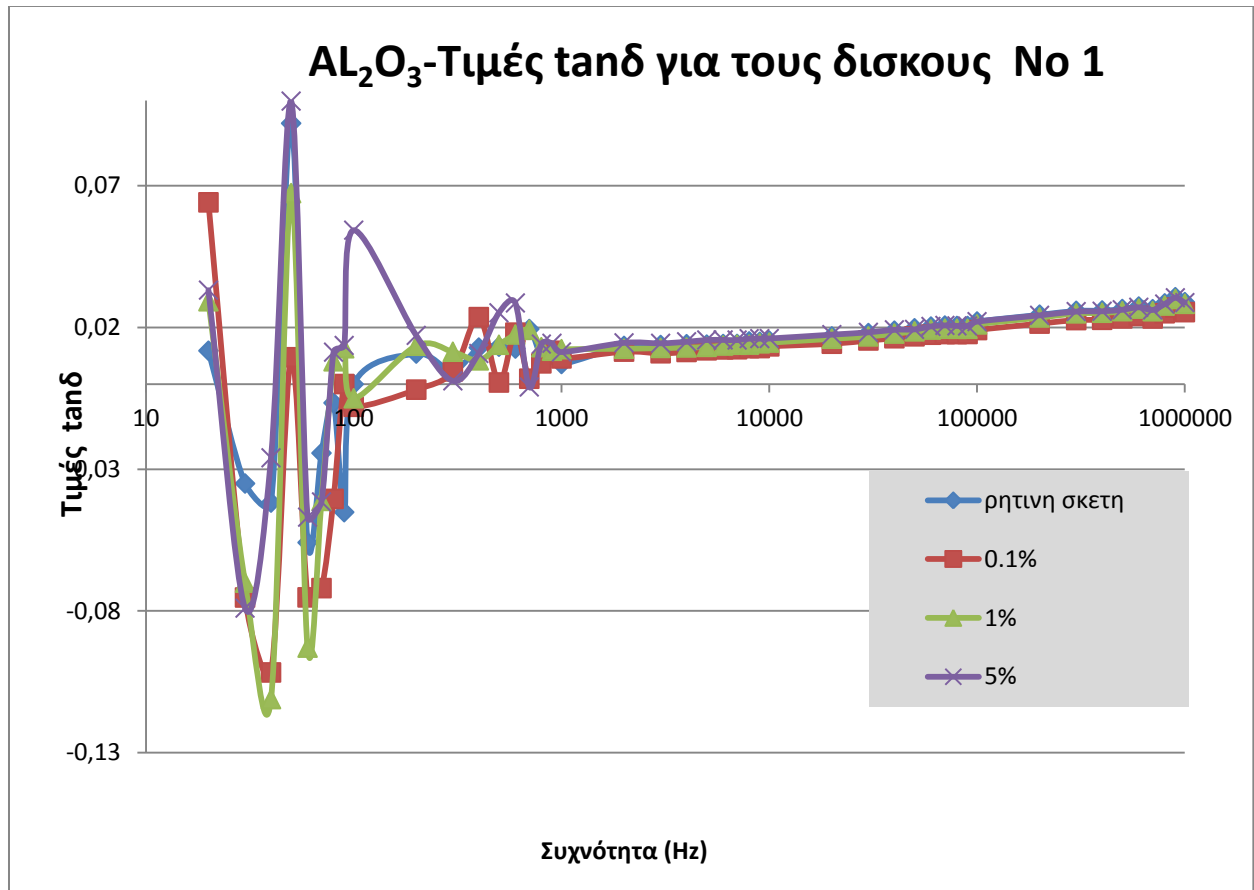


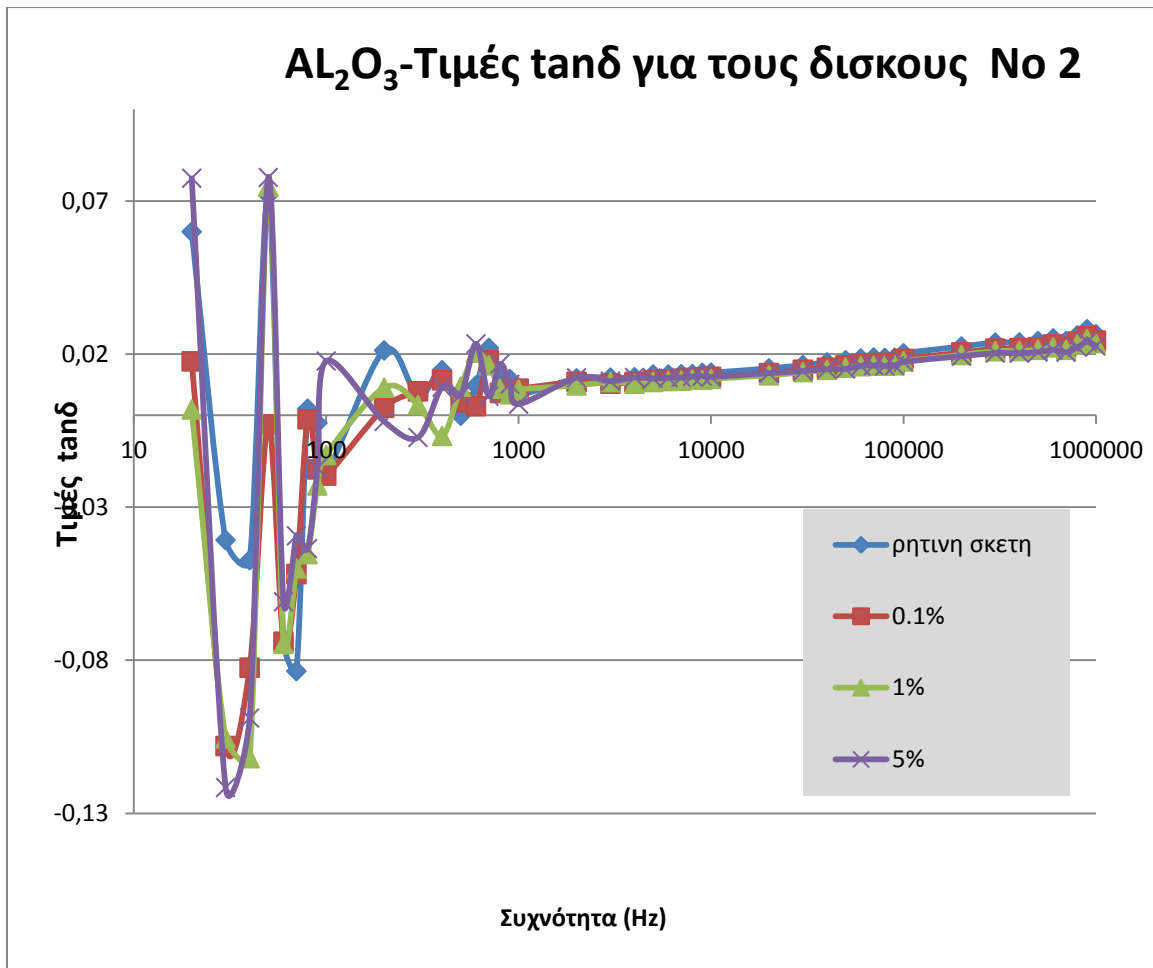




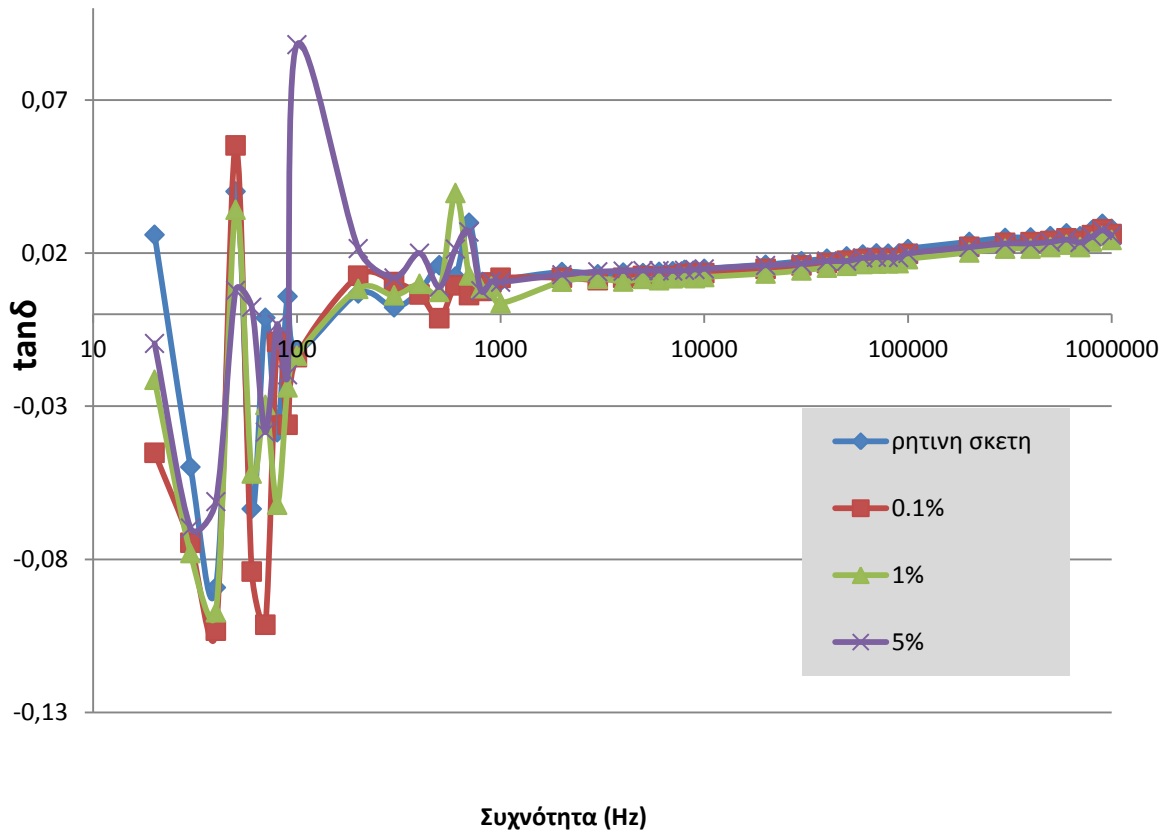
5.2 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων, των μετρήσεων μόνωσης στην γέφυρα χαμηλών συχνοτήτων

Η εφαιτομένη απωλειών στις προσμίξεις με Al_2O_3

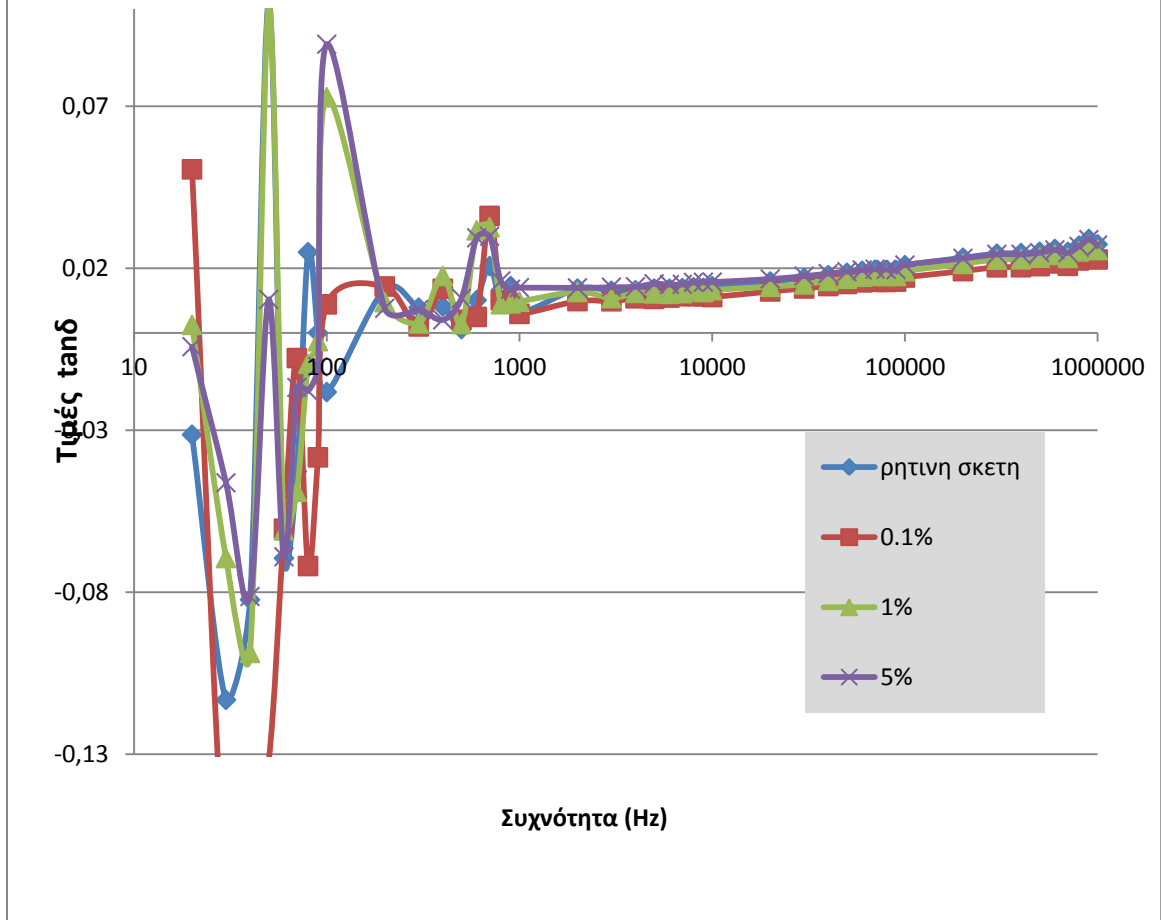


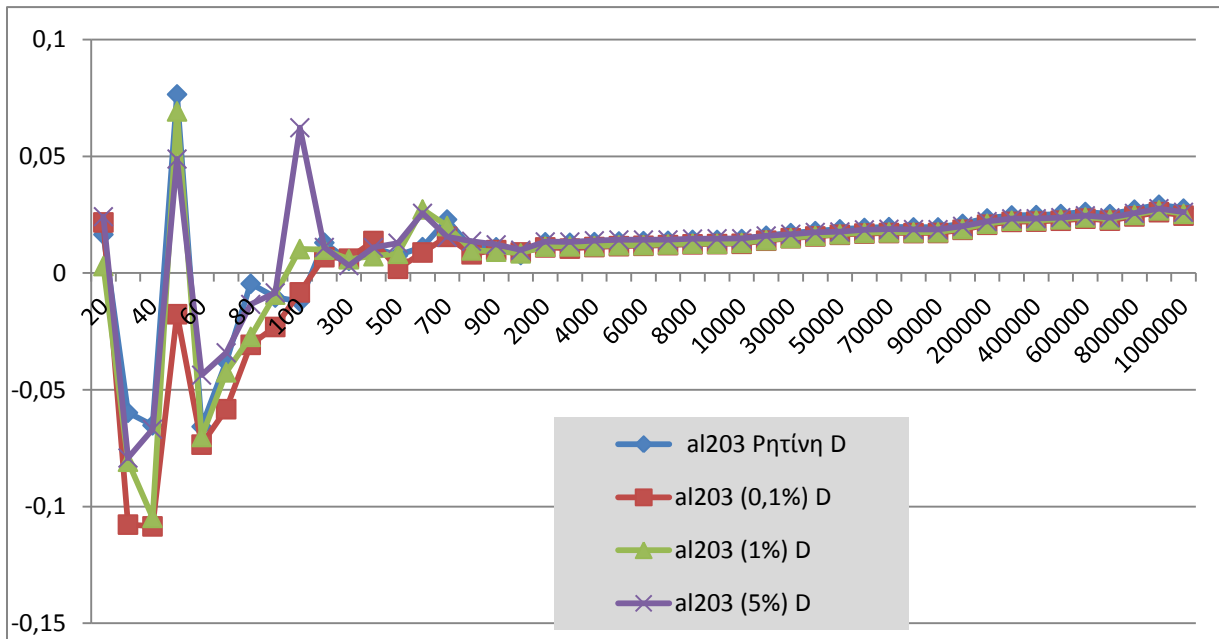
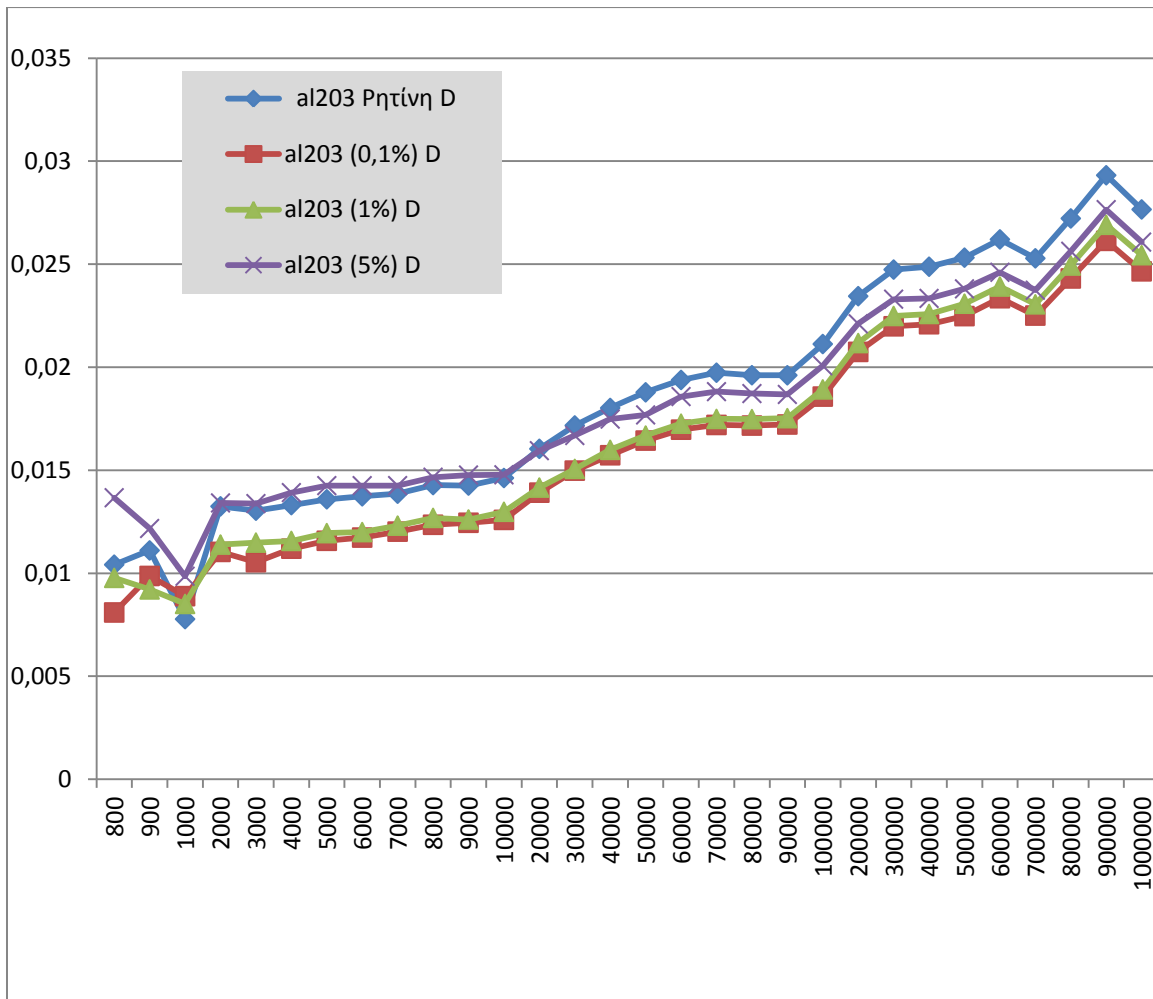


Al₂O₃-Τιμές tanδ για τους δισκούς No 3

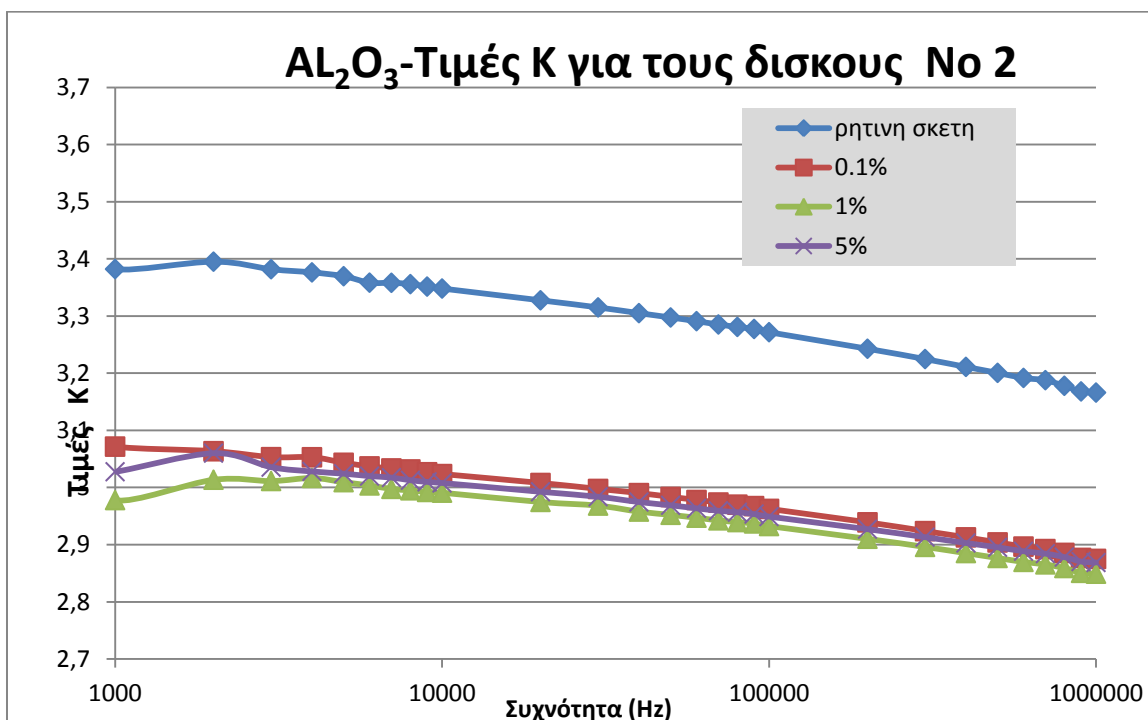
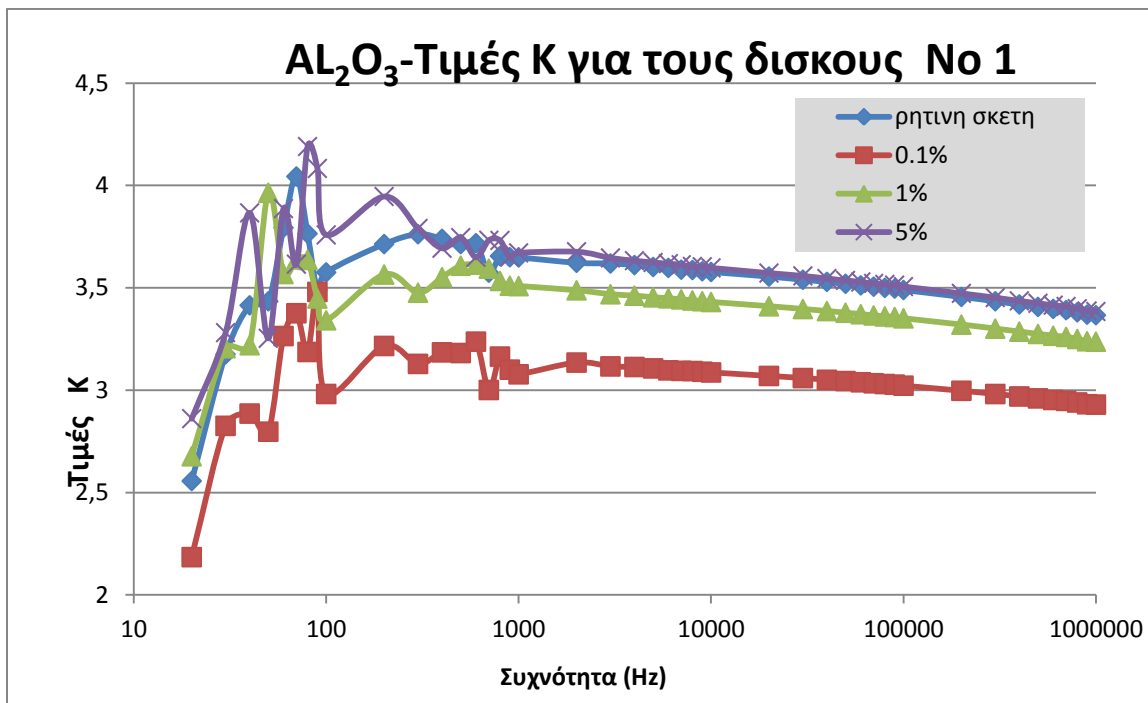


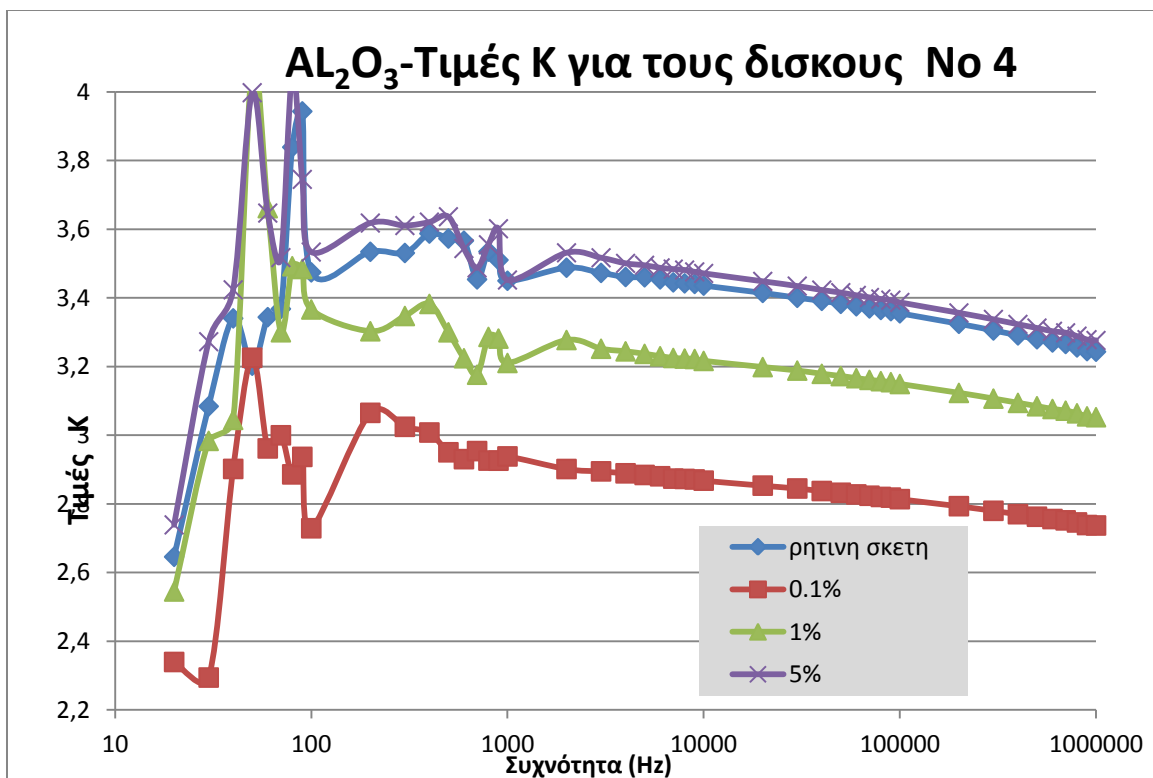
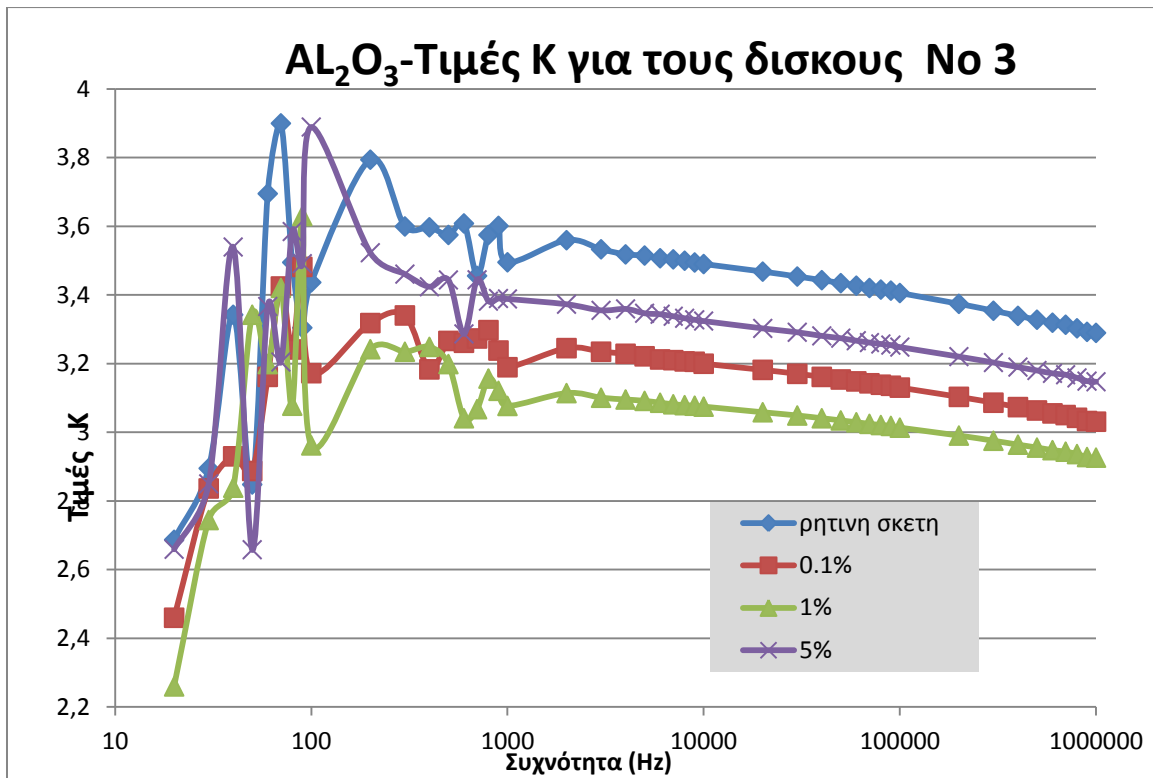
Al₂O₃-Τιμές tanδ για τους δισκούς No 4

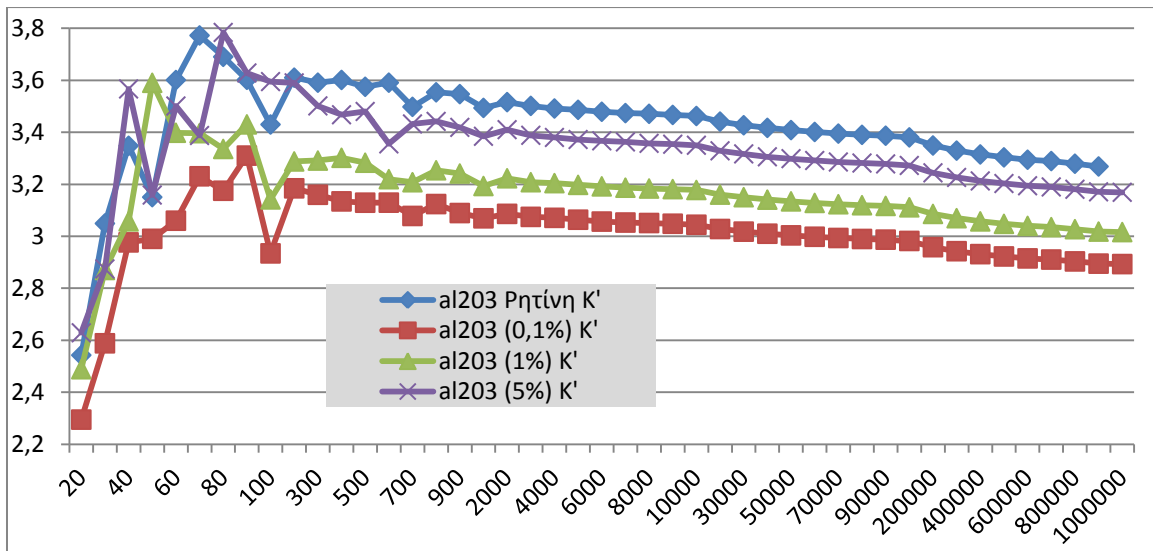




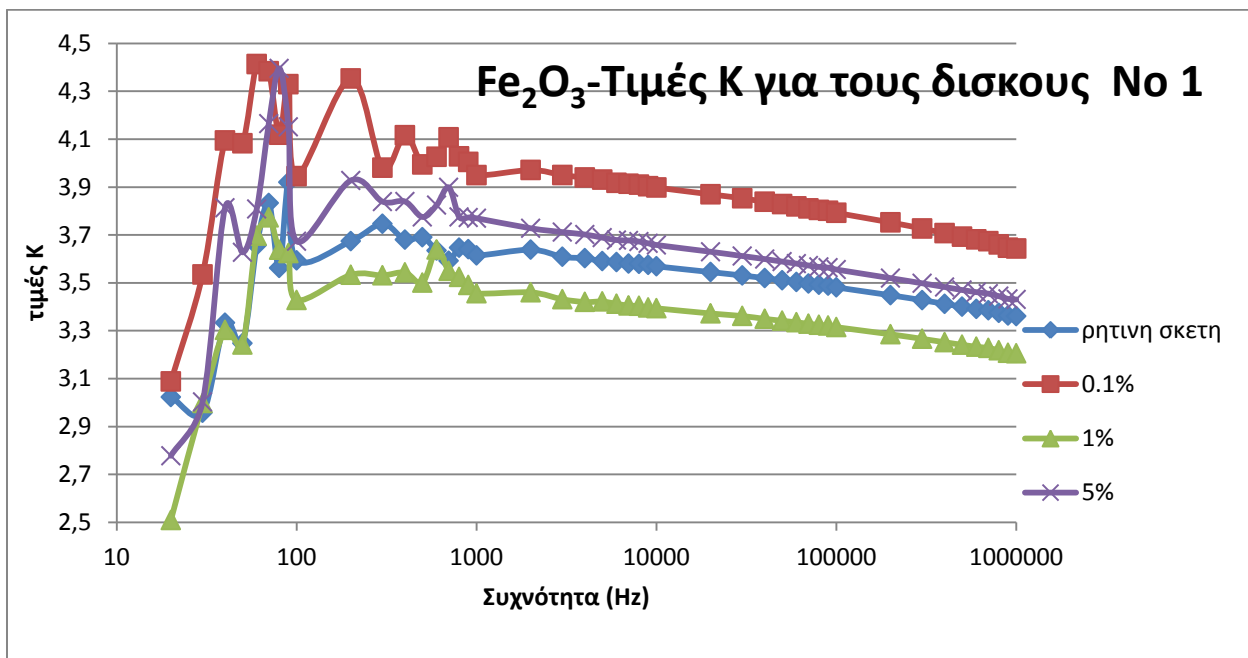
Η διηλεκτρική σταθερά κ' στις προσμίξεις με Al₂O₃

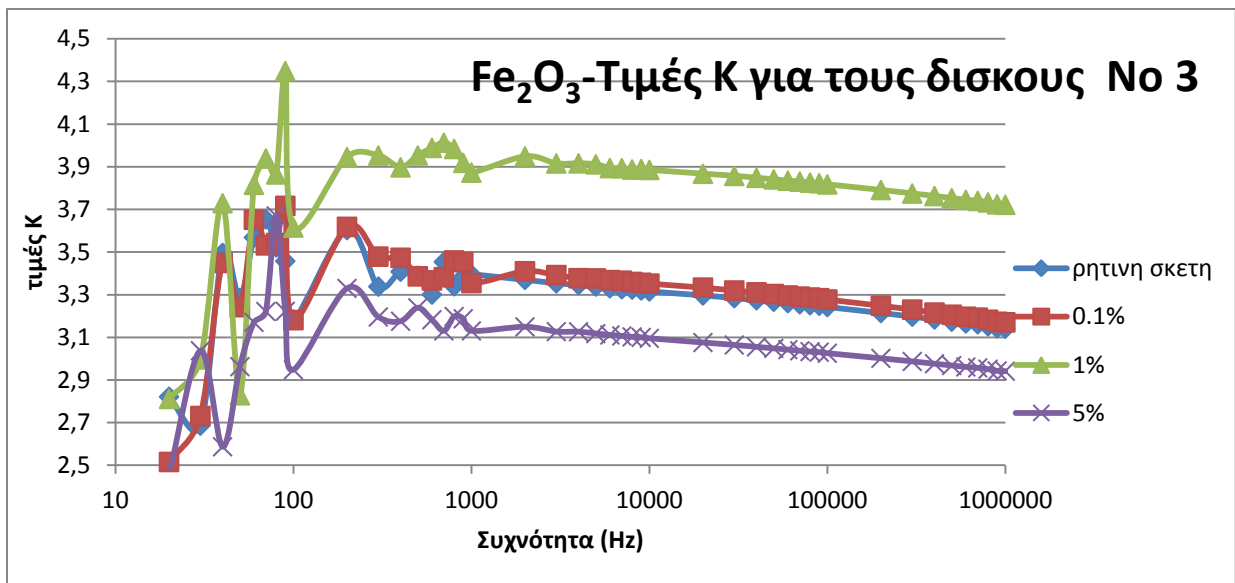
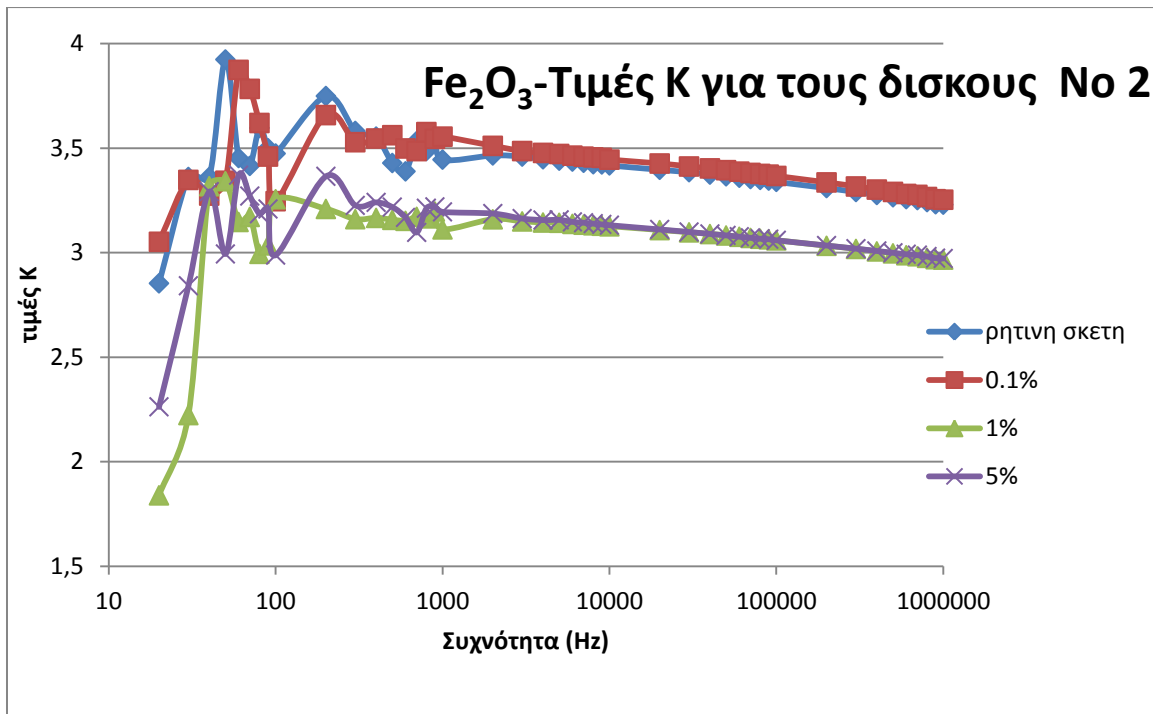


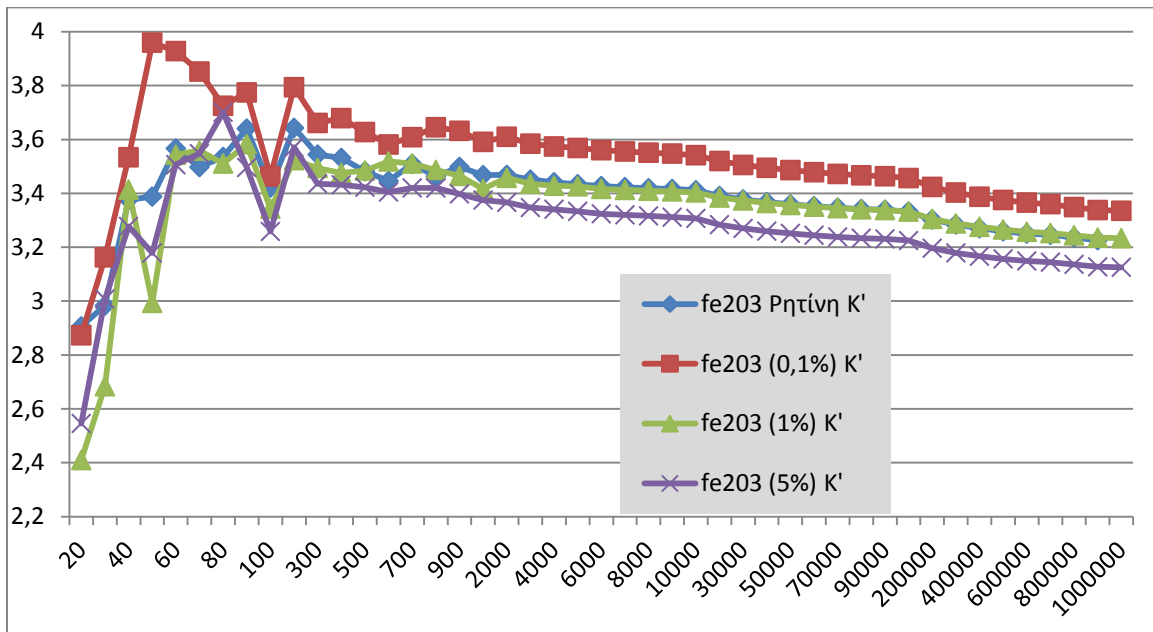
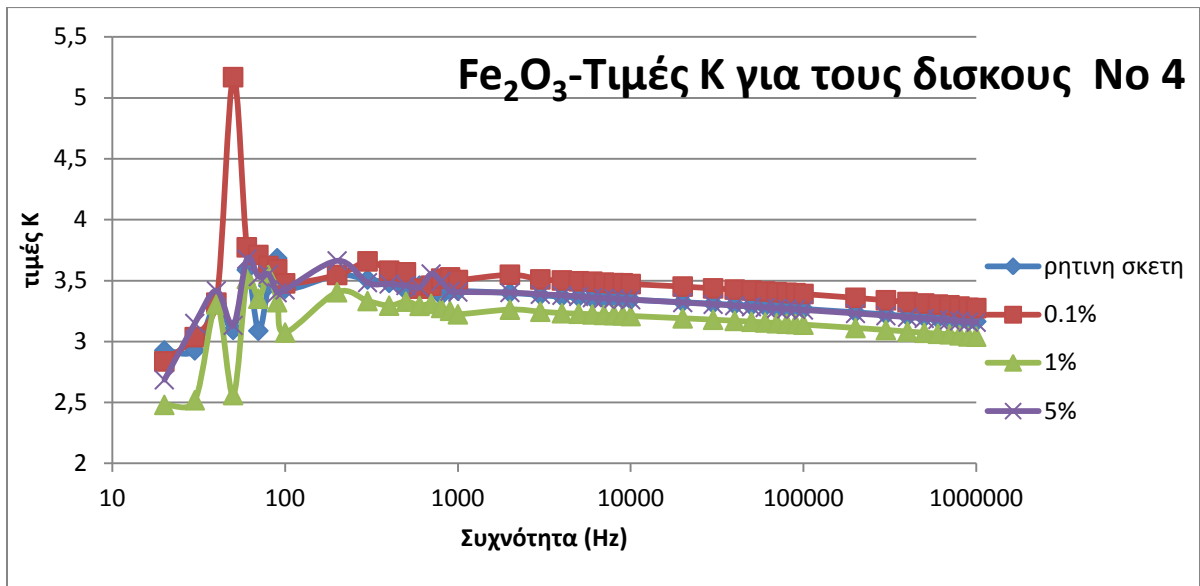




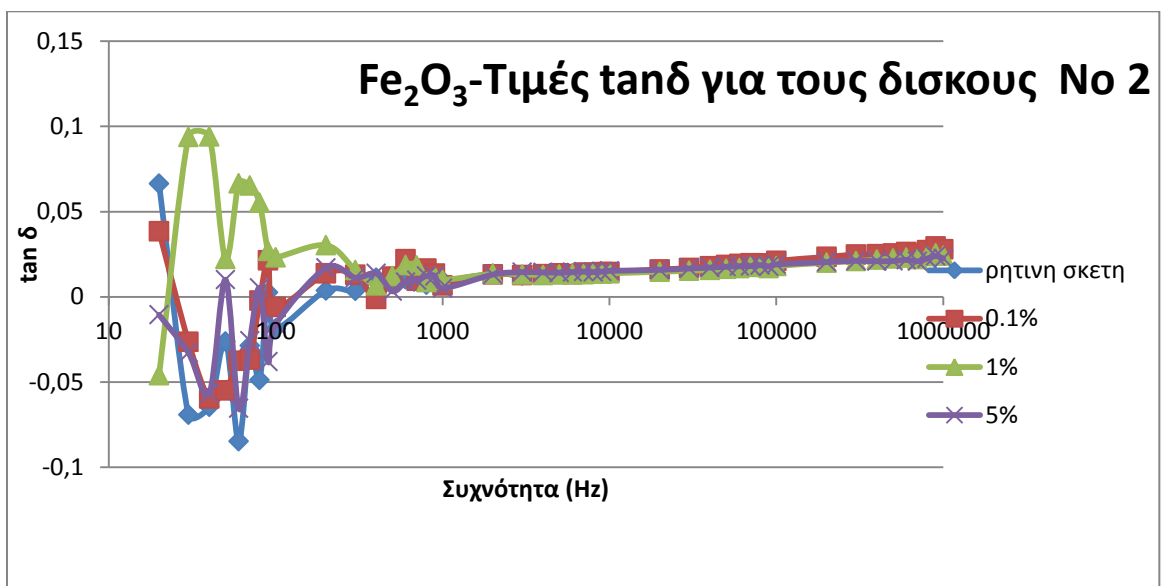
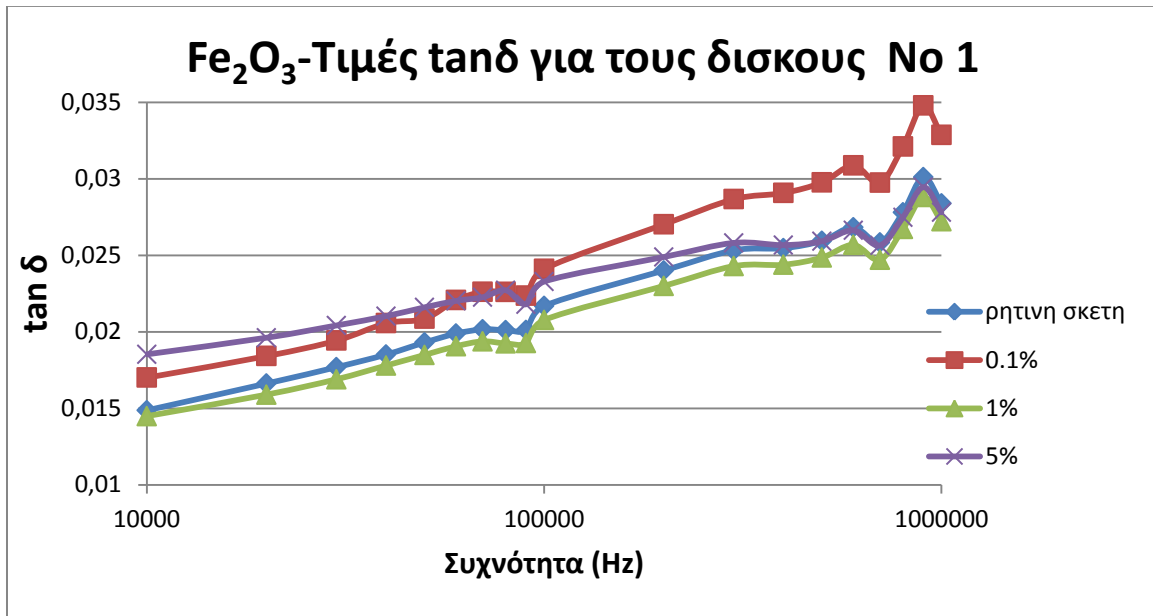
Η διηλεκτρική σταθερά κ' στις προσμίξεις με Fe₂O₃

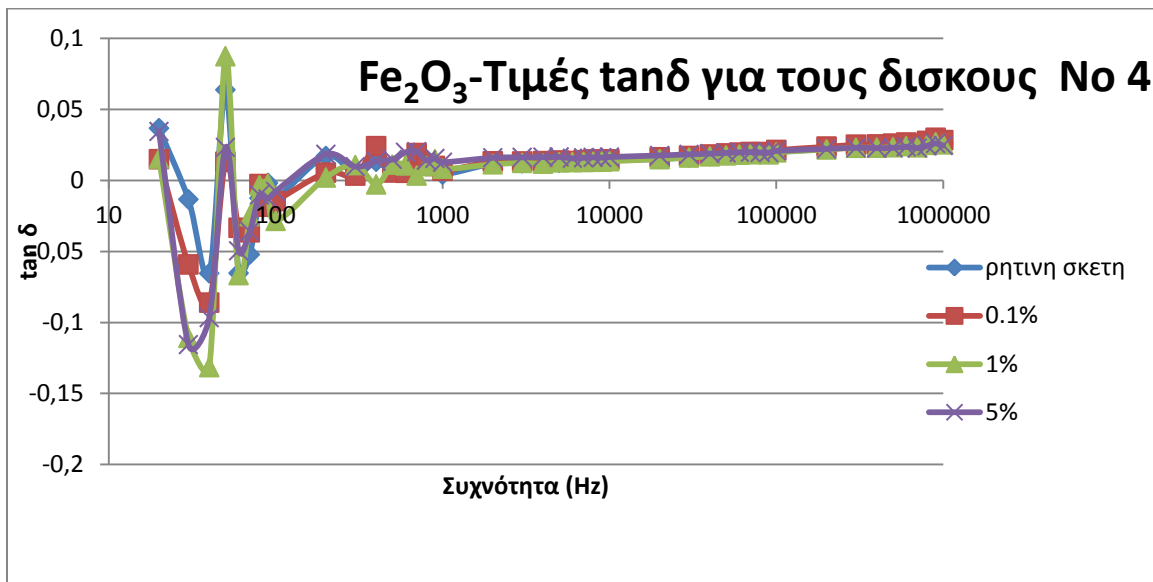
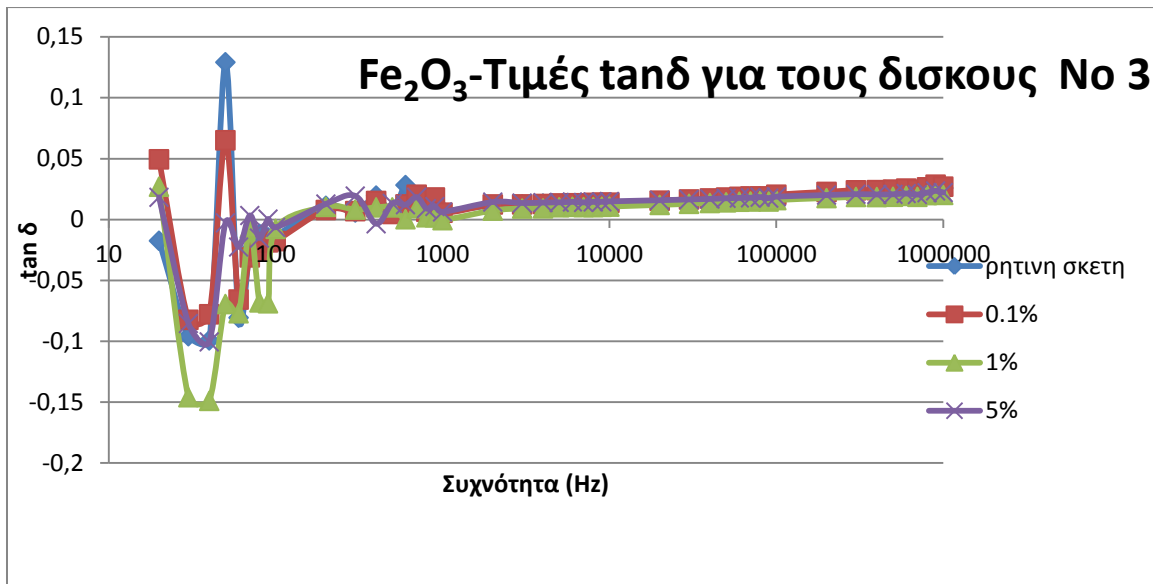


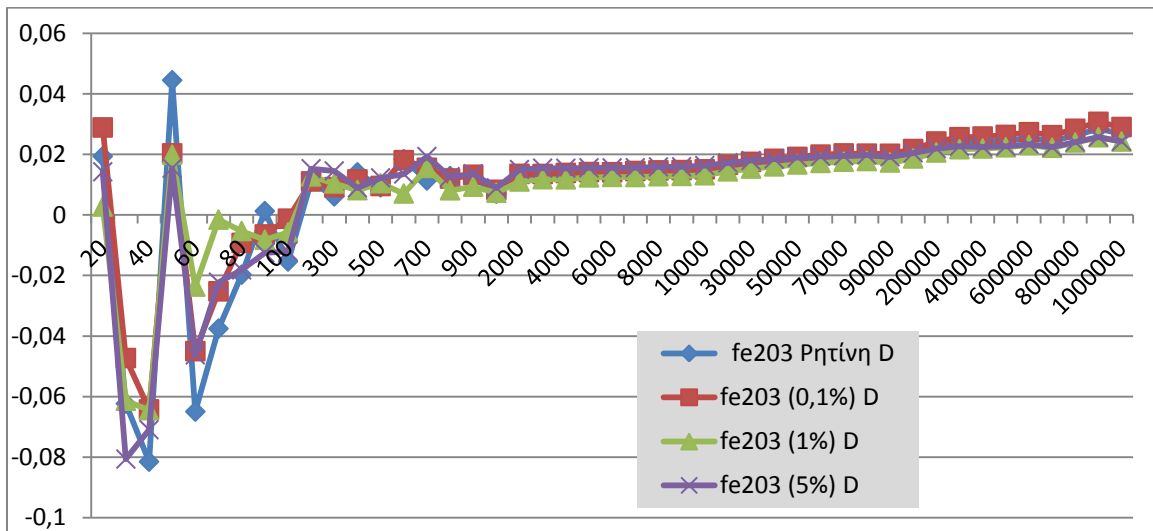
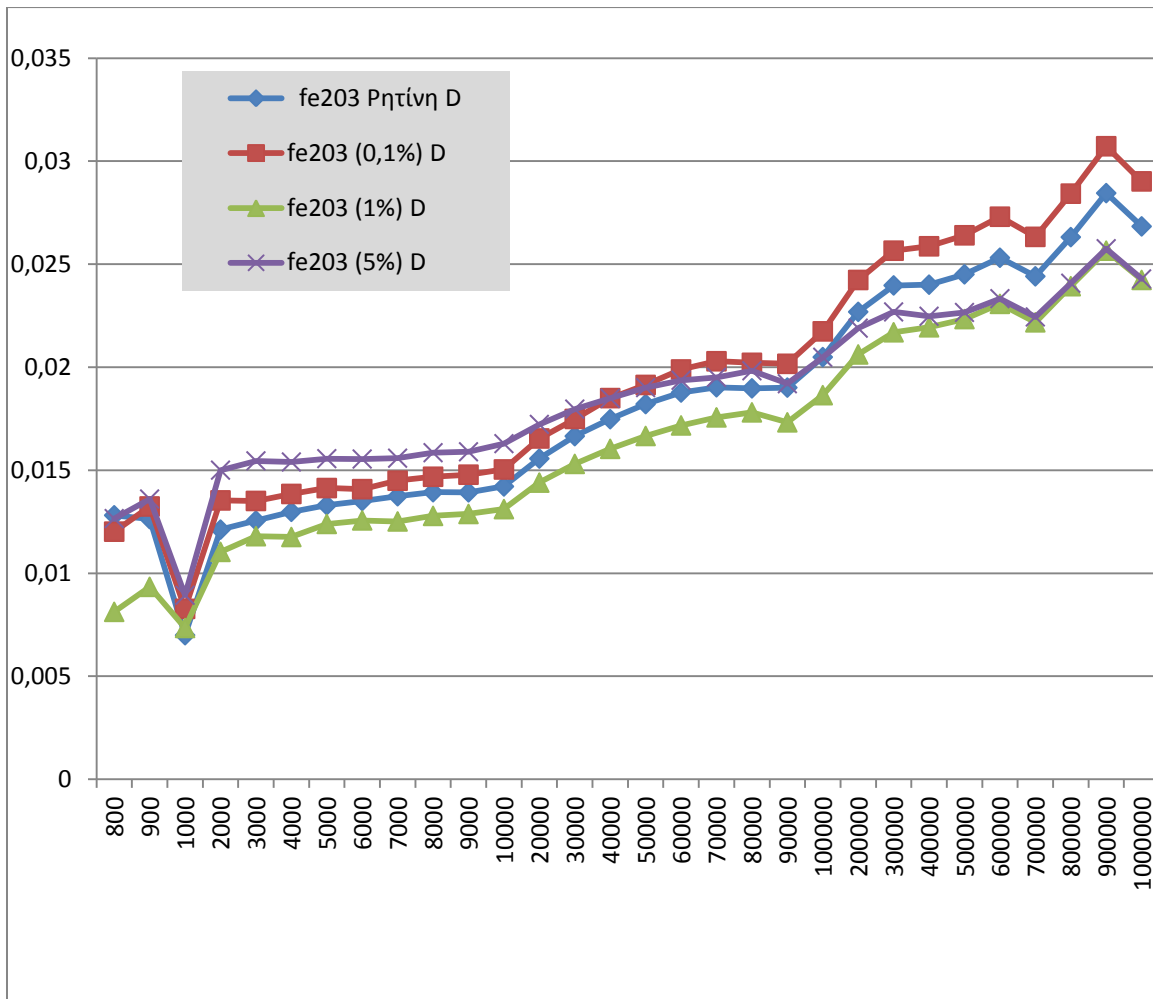




Η εφραπτομένη απωλειών στις προσμίξεις με Fe_2O_3







ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η αναγκαιότητα ενασχόλησης με το συγκεκριμένο ζήτημα προκύπτει από τη συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για υλικά με βελτιωμένη απόδοση και συγκεκριμένες ιδιότητες. Το πλήθος των εφαρμογών που πρέπει να καλυφθούν επαρκώς όσον αφορά στη χρήση των κατάλληλων κάθε φορά υλικών συνεπάγεται μεγάλη διασπορά και ποικιλία σχετικά με αυτές τις ιδιότητες, όπως το μικρότερο βάρος, τη μεγαλύτερη αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις και υψηλότερες θερμοκρασίες, το χαμηλότερο κόστος, το χαμηλότερο ενεργειακό αποτύπωμα, τη φιλική προς το περιβάλλον συμπεριφορά κ.α. Επομένως, κάθε ερευνητική προσπάθεια προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση έχει πρόσφορο πεδίο για την ανάπτυξή της.

Το πλήθος των κατηγοριών και των εκδοχών των χρησιμοποιούμενων πολυμερών καταδεικνύουν το ευρύ δυναμικό τους όσον αφορά στην κάλυψη των αυξημένων απαιτήσεων από πλευράς συνδυασμού ιδιοτήτων.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από την καταγραφή της ιστορικής εξέλιξης της χρήσης των πολυμερών υλικών, αυτά είναι συνυφασμένα με την εξέλιξη της ανθρώπινης δραστηριότητας, δείγμα του εύρους και της συχνότητας εφαρμογής τους.

Η επιλογή των υλικών πρόσμιξης (δηλαδή της αλουμίνιας και του οξειδίου του σιδήρου) βασίστηκε τόσο στις ιδιότητες των συγκεκριμένων υλικών όσο και στην αυξημένη τους διάθεση (λόγω παγιωμένων και αποδοτικών διαδικασιών παραγωγής τους). Η διερεύνηση επομένως της βελτίωσης της μονωτικής ικανότητας μέσω των συγκεκριμένων υλικών έχει ιδιαίτερο νόημα αν προσεγγιστεί υπό το πρίσμα των διατιθέμενων υλικών.

Ο βασικός άξονας της πειραματικής διαδικασίας αναφέρεται στη σύγκριση δοκιμίων που έχουν παρασκευαστεί από σκέτη ρητίνη με αντίστοιχα δοκίμια που έχουν προσμίξεις σωματιδίων οξειδίου του αργιλίου ή οξειδίου του σιδήρου, σε διαφορετικά ποσοστά συγκέντρωσης και την εν συνεχεία μέτρηση της μονωτικής τους ικανότητας εφαρμόζοντας τάση σε χαμηλές - βιομηχανικές συχνότητες (20Hz- 1MHz) και σε ψηλές- τηλεπικοινωνιακές συχνότητες (1MHz- 1GHz).

Η μέτρηση αυτή της μονωτικής ικανότητας και κατ' επέκταση των επιδράσεων των πρόσμιξεων του Fe_2O_3 και του Al_2O_3 στις διηλεκτρικές ιδιότητες των πολυμερικών μητρών, έγινε έμμεσα μέσω των μεγεθών της διηλεκτρικής σταθεράς και της εφαπτόμενης απωλειών του σύνθετου υλικού των δίσκων που παρασκευάστηκαν.

Η έννοια του διηλεκτρικού αναφέρεται στην ικανότητα του υλικού να αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια κατά την επιβολή εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, ενώ δρα ως μονωτικό εφόσον μέσω της συγκεκριμένης ικανότητάς του μπορεί να χρησιμεύσει για σκοπούς ηλεκτρικής μόνωσης. Με τον όρο διηλεκτρική σταθερά εννοείται η σχετική διηλεκτρική σταθερά, δηλαδή το πραγματικό μέρος της σχετικής μιγαδικής διηλεκτρικής σταθεράς (ή επιτρεπτότητας) και εκφράζει το πόση ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί στο υλικό από το επιβαλλόμενο πεδίο. Με την έννοια της εφαπτομένης απωλειών (λόγος μιγαδικής προς πραγματική συνιστώσα της σχετικής μιγαδικής διηλεκτρικής σταθεράς, με την πρώτη να εκφράζει τις διηλεκτρικές απώλειες του υλικού) εκφράζεται η δυνατότητα του υλικού να ακολουθεί τις μεταβολές του εξωτερικά επιβαλλόμενου πεδίου (χαλαρότητα). Η πειραματική διαδικασία βασίστηκε στην εξάρτηση των διηλεκτρικών ιδιοτήτων από τη μορφολογία του υλικού, με αύξηση της διηλεκτρικής σταθεράς να υποδηλώνει διηλεκτρική χαλάρωση και την εφαπτομένη απωλειών να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος του υλικού ή του μείγματος.

Θα πρέπει να αναφερθεί πως ιδιαίτερα σημαντικό στάδιο κατά την κατασκευή των δοκιμίων ήταν αυτό της ανάδευσης για την ομοιόμορφη κατανομή της συγκέντρωσης της πρόσμιξης σε όλο το δοκίμιο, με χαρακτηριστικό την επανάληψη της κατασκευής του δοκιμίου No3 εξαιτίας καθίζησης κόκκων αλουμίνας στο κάτω μέρος.

Όσον αφορά στις υψηλές συχνότητες και με βάση τα διαγράμματα που δημιουργήθηκαν παρατηρήθηκαν τα εξής:

- Πολύ μικρή αύξηση της εφαπτομένης απωλειών για πρόσμιξη συγκέντρωσης του 5% αλουμίνας σε σχέση με το δοκίμιο της σκέτης ρητίνης (της τάξης του 8%), με την παρατήρηση να ισχύει για το σύνολο των 4 δίσκων (όπως προκύπτει άλλωστε και από το συγκεντρωτικό διάγραμμα του μέσου όρου).
- Η μεταβολή της διηλεκτρικής σταθεράς λαμβάνει χώρα αυξητικά (υποδηλώνοντας διηλεκτρική χαλάρωση) σε σχέση με την πρόσμιξη με αλουμίνα, όχι όμως αναλογικά με την ποσότητα αυτής της πρόσμιξης. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται για συγκέντρωση πρόσμιξης της τάξης του 0,1% (αντί για 5% όπως θα ήταν αναμενόμενο σε μια αναλογική σχέση μεταβολής).

Η αύξηση αυτή σε μέσο όρο έφτασε περίπου το 24% με το ποσοστό να ανέρχεται στο 12% για συγκεντρώσεις πρόσμιξης 1 και 5%. Η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς μεταβλήθηκε κατά τον ίδιο τρόπο (μειώθηκε) με την αύξηση της συχνότητας.

- Μικρή απόκλιση των τιμών της εφαπτομένης απωλειών για την περίπτωση προσμίξεων οξειδίου του σιδήρου, με σημείο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος το γεγονός ότι η διαφορά εμφανίζεται μόνο στη συγκέντρωση του 5%, με τις αντίστοιχες του 0,1 και 1% να μην επηρεάζουν τη συγκεκριμένη μεταβλητή.
- Όσον αφορά στη μεταβολή της διηλεκτρικής σταθεράς για τις προσμίξεις με οξείδιο του σιδήρου η επίδραση των προσμίξεων ήταν πολύ μικρή, με τη μεγαλύτερη τιμή να διαφέρει ανά δίσκο και δοκίμιο, με τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα να καταδεικνύουν επιρροή στην τιμή του συγκεκριμένου μεγέθους από συγκεντρώσεις προσμίξεων μεγαλύτερες του 1%.

Όσον αφορά στις χαμηλές συχνότητες και με βάση τα διαγράμματα που δημιουργήθηκαν παρατηρήθηκαν τα εξής:

- η εφαπτομένη απωλειών όσον αφορά στις προσμίξεις αλουμίνας παρουσίασε συντονισμό στο εύρος συχνοτήτων 20-100 Hz, με τη μεγαλύτερη τιμή να σχετίζεται με τη συγκέντρωση του 5% (χωρίς όμως να υφίσταται αναλογική μεταβολή με την αύξηση της συγκέντρωσης πρόσμιξης). Στο φάσμα 100 Hz – 1MHz η μεταβολή της εφαπτομένης απωλειών γίνεται με τον ίδιο τρόπο για το σύνολο των δοκιμίων με την τιμή της εφαπτομένης απωλειών να είναι μικρότερη για κάθε πρόσμιξη σε σχέση με αυτή της καθαρής ρητίνης (με τη διαφορά να είναι μικρότερη για την περίπτωση της συγκέντρωσης του 5% και του 1% κατά σειρά, οδηγώντας στο συμπέρασμα πως στο συγκεκριμένο φάσμα η πρόσμιξη μειώνει την τιμή της εφαπτομένης απωλειών).
- Ανάλογες παρατηρήσεις ισχύουν και για την περίπτωση της διηλεκτρικής σταθεράς όσον αφορά στις προσμίξεις αλουμίνας, με την παρουσίαση συντονισμού στο εύρος συχνοτήτων 20-100 Hz και μείωση σε συνολικό επίπεδο της διηλεκτρικής σταθεράς (με αυτή τη μείωση να είναι μικρότερη με την αύξηση της συγκέντρωσης της πρόσμιξης).
- Το στοιχείο του συντονισμού με την ίδια μορφή ισχύει και για την περίπτωση της πρόσμιξης με οξείδιο του σιδήρου, με τη μεταβολή της διηλεκτρικής σταθεράς να

είναι μετά τα 100 περίπου Hz ίδια για το σύνολο των δοκιμίων (με μια μικρή εμφάνιση μεγαλύτερης τιμής για τη συγκέντρωση του 0,1%).

- Τέλος, η μεταβολή της εφαπτομένης απωλειών της πρόσμιξης με οξείδιο του σιδήρου σε σχέση με την καθαρή ρητίνη είναι πολύ μικρή.

Σημείο που χρήζει περαιτέρω έρευνας είναι ο κατά το δυνατό περιορισμός των μειονεκτημάτων των πολυμερών όπως η συμβολή τους στην περιβαλλοντική ρύπανση, το ότι είναι ιδιαίτερα εύφλεκτα και το χαμηλό σημείο τήξεώς τους, αυξάνοντας έτσι ακόμα περισσότερο την αποδοτικότητα της εφαρμογής τους.

Βιβλιογραφία

- [1] Ψαρράς Γ. Χ. (1994), Διδακτορική διατριβή «Μελέτη ηλεκτρικών ιδιοτήτων του σύνθετου υβριδικού συστήματος εποξειδικής ρητίνης-αραμιδικών ινών-κόκκων μετάλλου», Αθήνα, ΕΜΠ
- [2] Γ. Κοντός (2008), Διπλωματική εργασία με τίτλο «Φαινόμενα ηλεκτρικής χαλάρωσης σε σύνθετα υλικά εποξειδικής ρητίνης-κεραμικού TiO_2 », Πανεπιστήμιο Πατρών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Φυσικής
- [3] F. L. Matthews and R. D. Rawlings (1999), Composite materials: Engineering and Science, Woodhead Publishing
- [4] T. Tankara, G. C. Montanari, R. Mulhaupt (2004), Polymer Nanocomposites as Dielectrics and Electrical Insulation-perspectives for Processing Technologies, Material Characterization and Future Applications, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 11, No. 5, 1070-9878/04/ IEEE.
- [5] Ε. Φιαμέγκου (2008), Μεταπτυχιακή Εργασία με τίτλο «Πολυμερή με βελτιωμένες μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες για παρακολούθηση βλάβης, με χρήση πολυφλουϊκών νανοσωληνίσκων άνθρακα», Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Πολυμερών», Πανεπιστημίου Πάτρας
- [6] Hull D., Clyne T.W. (1981), An Introduction to Composite Materials, Cambridge University Press
- [7] Chawla K. K. (1987), Composites Materials. Science and Engineering. Springer
- [8] Schwartz M.M. (1984) Composite Materials Handbook. McGraw-Hill
- [9] Δ. Παντελής (1996), «Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά (δομή – ιδιότητες – τεχνολογία -εφαρμογές), Εκδόσεις Παπασωτηρίου
- [10] Σ. Κατσουγιάννη (2008), Διπλωματική εργασία με τίτλο «Βιοδιασπώμενα πολυμερή στη σχεδίαση για το περιβάλλον» Τμήμα Μηχανικών Σχεδίασης Προϊόντων και Συστημάτων, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Σύρος
- [11] Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Πολυμερή & Σύνθετα Υλικά - OnLine Υλικό Διδασκαλίας, Εισαγωγή στην Επιστήμη και Τεχνολογία των Πολυμερών
http://www.metal.ntua.gr/index.pl/notes7d2d28d8_gr

- [12] Advanced Technology Testing and Research (ATTAR),
<http://www.attar.com.au/materials-engineering.aspx>
- [13] Παρουσίαση με τίτλο Πολυμερή
<http://www.eng.ucy.ac.cy/krasia/polymers%202011.pdf>
- [14] CivilPlus Epoxy Laboratories
http://www.civilplus.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=192:2010-11-18-10-07-12&catid=65:2010-11-18-09-52-18&Itemid=158
- [15] Σημειώσεις «Μη Μεταλλικά Υλικά», Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης, Πολυτεχνείο Κρήτης
<http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSATHRIO/YLIKA/SHMEIOWSEIS/8%20MH%20METALLIKA%20YLIKAw.pdf>
- [16] Ο.Π. Κοντοπούλου (2014), Διπλωματική Εργασία με τίτλο «Κατασκευή και χαρακτηρισμός σύνθετων διηλεκτρικών υλικών:Εφαρμογή σε εποξειδική ρητίνη με προσθήκη μικρο-σωματιδίων Al₂O₃», ΗΜΜΥ ΕΜΠ, Τομέας Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών, Αθήνα
- [17] Τμήμα Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, Παρουσίαση με τίτλο «Βωξίτες»
http://www.geo.auth.gr/courses/gmo/gmo645y/pdf_theory/boxites.pdf
- [18] http://www.chem.uoa.gr/chemicals/chem_Al2O3.htm
- [19] Σταθάρας, Ε.Χ. (2012), Διπλωματική εργασία με τίτλο Ανάπτυξη, χαρακτηρισμός και προσομοίωση νανοκόνεων φερρίτη, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Μηχανικών Μεταλλίων Μεταλλουργών Εργαστήριο Μεταλλογονώσεως & Τεχνολογίας Υλικών
- [20] http://mineralshow.gr/site/index.php?page=shop.product_details&category_id=32&product_id=86%3D0&option=com_virtuemart&lang=el&vmcchk=1&Itemid=17
- [21] http://www.emg.ing.tu-bs.de/forschung/material/maghemite_d.html
- [22] <http://www.mindat.org/min-2533.html>
- [23] Copyright Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Αθήνας, Βασιλική Μπέλεση 2014. Βασιλική Μπέλεση. «Υλικά Γραφικών Τεχνών (Θ). Ενότητα 6: Οξειδία του σιδήρου – μαγνητικά υλικά». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: ocp.teiath.gr.
- [24] [https://en.wikipedia.org/wiki/Iron\(III\)_oxide](https://en.wikipedia.org/wiki/Iron(III)_oxide)
- [25] Γ. Παπαλάμπρης (2008), Διπλωματική εργασία με τίτλο «Παραγωγή και χαρακτηρισμός ημιαγώγιμων υμενίων σεληνιούχου καδμίου για ηλεκτρικές

εφαρμογές», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών

- [26] Ι.Α. Μέργος (2007), Διδακτορική Διατριβή με τίτλο «Διηλεκτρικά Υλικά και Περιβάλλον» Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών
- [27]
- [28] Κ.Θ. Δέρβος (2006), «Μονωτικά υλικά υψηλών τάσεων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- [29] E.M. Purcell (2004), «Ηλεκτρισμός και μαγνητισμός», Σειρά Φυσικής του Berkeley. Τόμος 2, Μετάφραση από τη 2^η αγγλική έκδοση. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα
- [30] Κ. Καγκαράκης (1994), «Μαθήματα στα ηλεκτροτεχνικά υλικά – 1» Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα
- [31] R. A. Levy (1977) Αρχές της Φυσικής Στερεάς Κατάστασης. Εκδόσεις Γ. Πνευματικός
- [32] Μ. Δ. Αθανασοπούλου (2012), “Διηλεκτρικές ιδιότητες σύνθετων υλικών”, Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα
- [33] R. C. Johnson (1993), Antenna Engineering Handbook, Third Edition, McGraw-Hill, New York, USA