



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Διπλωματική Εργασία**

**Ανάπτυξη και μέτρηση ιδιοτήτων σύνθετων υλικών (composites)  
Development and measurement of composites materials properties**

**Φοιτητής: Φίκας Αλέξανδρος  
Αριθμός Μητρώου: 18392029**

**Ακαδημαϊκό Έτος: 2022 - 2023**

**Επιβλέπων: Δρ. ΙΩΑΝΝΗΣ ΣΑΡΡΗΣ**

**Αθήνα-Αιγάλεω, Ιούλιος 2023**

**Πνευματικά Δικαιώματα © Με την επιφύλαξη όλων των νόμιμων δικαιωμάτων.  
Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής 2023.**



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA  
ENGINEERING SCHOOL  
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

**Dissertation**

**Development and measurement of composites materials properties**

**Student: Fikas Alexandros  
Identification Number: 18392029**

**Academic Year: 2022 - 2023**

**Supervisor: Dr. Ioannis Sarris**

**Athens-Egaleo, July 2023**

**Copyright © All rights reserved.  
University Of West Attica 2023.**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Ανάπτυξη και μέτρηση ιδιοτήτων σύνθετων υλικών (composites)  
Development and measurement of composites materials properties**

Ακολούθως παρατίθενται τα Μέλη της Εξεταστικής Επιτροπής.

Η διπλωματική εργασία εγκρίθηκε με επιτυχία από τη τριμελή Εξεταστική Επιτροπή:

<b>A/a</b>	<b>Όνοματεπώνυμο</b>	<b>Ιδιότητα</b>	<b>Ψηφιακή Υπογραφή</b>
<b>1.</b>	<b>Σαρρής Ιωάννης</b>	<b>Καθηγητής</b>	
<b>2.</b>	<b>Βασιλόπουλος Κωνσταντίνος-Ιωάννης</b>	<b>Διδάκτορας ΕΣΠΑ</b>	
<b>3.</b>	<b>Καρβέλας Ευάγγελος</b>	<b>Ακαδημαϊκός Υπότροφος</b>	

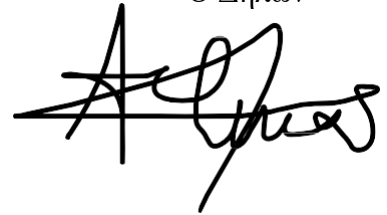
## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΦΙΚΑΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ του ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ, με αριθμό μητρώου 18392029 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



## Περίληψη

Στο κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>, αναφερόμαστε στο στόχο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, όπου πρακτικά είναι η μελέτη, πειραματική ανάλυση διηλεκτρικής σταθεράς σύνθετου υλικού και καταληκτικά η ανάγκη κατασκευής σύνθετου υλικού με ελεγχόμενη τιμή διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r$ . Στο κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>, παρουσιάζουμε τη βασική βιβλιογραφία. Αναφέρουμε βασικά στοιχεία για τα σύνθετα και διηλεκτρικά υλικά, τη σύνθετη διηλεκτρική επιτρεπτότητα καθώς και τη μέθοδο με την οποία μετράμε τη διηλεκτρική σταθερά, το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, στατιστικές έννοιες και άλλα ερευνητικά άρθρα που ασχολούνται με τη διηλεκτρική σταθερά ανθρώπινων ιστών σε μικροκυματικές συχνότητες. Στο κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>, ασχολούμαστε αρχικά με τον εργαστηριακό εξοπλισμό, όπου αναφέρουμε ποιος είναι, μαζί με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του και τα μέτρα ατομικής προστασίας. Ύστερα, αναφερόμαστε στον αναλυτικά στον εξοπλισμό μέτρησης της διηλεκτρικής σταθεράς. Εισάγουμε εικόνες και πίνακες, που διευκολύνουν την ανάγνωση του κειμένου. Στο κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>, δείχνουμε τα βήματα που ακολουθούμε για την πειραματική διαδικασία και την παραγωγή του δοκιμίου. Κατόπιν, επιδεικνύουμε με λεπτομέρεια τη συναρμολόγηση του μετρητικού συστήματος, τη βαθμονόμηση του και πως το χρησιμοποιούμε για να εξάγουμε τα πειραματικά μας δεδομένα. Τέλος, στο κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>, αναδεικνύουμε τα αποτελέσματα των πειραματικών μας δεδομένων. Δημιουργούμε πίνακες, διαγράμματα και παράγουμε μαθηματικά μοντέλα. Παράλληλα, αναφέρουμε τις παρατηρήσεις και τα προβλήματα του εξεταζόμενου υλικού. Μεταγενέστερα, κατασκευάζουμε και ελέγχουμε πολλαπλά δοκίμια με τα αντίστοιχα πρωτόκολλα τους, με στόχο την ανάπτυξη καινούργιου πρωτόκολλου. Με την επιλογή του καινούργιου πρωτόκολλου, παράγουμε 3 σειρές δοκιμίων, εξετάζουμε την επαναληψιμότητα τους και το συγκρίνουμε με το αρχικό. Μετά, δείχνουμε τη τρισδιάστατη επιφάνεια που μας βοηθά στην εύρεση ιδιοτήτων σύνθετου υλικού. Τέλος, απαιτούμε συγκεκριμένη τιμή σχεδιασμού υλικού για τη διηλεκτρική σταθερά, προβάλλουμε διαγράμματα με τη διάρκεια ζωής των δοκιμίων του αρχικού πρωτόκολλου, παραθέτουμε τους περιορισμούς που αντιμετωπίσαμε και προτείνουμε μερικές ιδέες για μελλοντική ενασχόληση.

**Λέξεις κλειδιά:** Διηλεκτρική σταθερά, αναλογία απιονισμένου νερού – σιλικόνης, καινούργιο πρωτόκολλο, μέθοδος ομοαξονικού ανιχνευτή ανοιχτού άκρου, διανυσματικός αναλυτής δικτύου, μικροκυματική συχνότητα, φαντάσματα κεφαλής, επιφάνεια εύρεσης ιδιοτήτων υλικού.

## Abstract

In chapter 1, we refer to the aim of this thesis, which is the study and experimental analysis of the dielectric constant of a composite material and finally the need to fabricate a composite material with a controlled value of dielectric constant  $\epsilon_r$ . In chapter 2, we present the basic literature. We report basic facts about composite and dielectric materials, the relative permittivity as well as the method by which we measure the dielectric constant, the electromagnetic spectrum, statistical concepts and other research articles dealing with the dielectric constant of human tissues at microwave frequencies. In chapter 3, we first deal with the laboratory equipment, where we mention what it is, together with its technical characteristics and personal protection measures. Then, we discuss in detail the equipment for measuring the dielectric constant. We introduce illustrations and tables to facilitate the reading of the text. In chapter 4, we show the steps followed for the experimental procedure and the production of the test specimen. Then, we demonstrate in detail the assembly of the measuring system, its calibration and how we use it to extract our experimental data. Finally, in chapter 5, we highlight the results of our experimental data. We create tables, graphs and generate mathematical models. At the same time, we report the observations and problems of the material under testing. Later, we construct and test multiple specimens with their respective protocols, with the goal of developing a new protocol. Upon selecting the new protocol, we produce 3 sets of specimens, test their repeatability, and compare it with the original one. Then, we show the 3-D surface that help us to find composite properties. In the end, we require a specific material design value for the dielectric constant, show diagrams with the lifetime of the specimens of the original protocol, list the limitations we encountered and suggest some ideas for future work.

**Keywords:** Dielectric constant/relative permittivity, deionized water – silicone ratio, new protocol, open-ended coaxial probe method, vector network analyzer (VNA), microwave frequency, head phantoms, material property surface

## Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Ιωάννη Σαρρή για τον χρόνο που αφιέρωσε να με βοηθήσει στην επιλογή του θέματος και την καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής. Περαιτέρω, η συμβολή όλων των καθηγητών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών ήταν καίριας σημασίας για τη συνεχή ενασχόληση και ενδιαφέρον μου με το αντικείμενο των σπουδών μου.

Επιπλέον, ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλα τα μέλη της εταιρείας MetaMaterials, που με χαρά με δέχθηκαν στον χώρο τους, με σκοπό να ολοκληρώσω τη διπλωματική μου μελέτη. Ιδιαίτερα, στον κ. Ρομπόλα Διονύση, κ. Θωμά Βασιλείου και κ. Σωτηρίου Ιωάννη, όπου η πλοήγηση και η συμπαράσταση τους επί της εργασίας ήταν άκρως σημαίνουσα.

Τέλος, η υποστήριξη και η αγάπη της οικογένειάς μου και των φίλων μου, με τιμά ξεχωριστά καθώς μου δίνει καθημερινή ώθηση για την επίτευξη των στόχων μου.

## Πίνακας περιεχομένων

<b>Περίληψη</b> .....	<b>5</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>6</b>
<b>Ευχαριστίες</b> .....	<b>7</b>
<b>Κατάλογος Εικόνων</b> .....	<b>10</b>
<b>Κατάλογος Πινάκων</b> .....	<b>14</b>
<b>Κατάλογος Διαγραμμάτων</b> .....	<b>16</b>
<b>Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Εισαγωγή</b> .....	
1.1 Σκοπός Εργασίας .....	17
<b>Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Βασική Βιβλιογραφία</b> .....	
2.1 Τι Είναι Τα Σύνθετα Υλικά.....	18
2.1.1 Πλεονεκτήματα Και Μειονεκτήματα Σύνθετων Υλικών .....	19
2.1.2 Διηλεκτρικά Υλικά .....	20
2.1.3 Σύνθετη Διηλεκτρική Επιτρεπτότητα $\epsilon^*/\epsilon_r$ (Complex Permittivity) .....	21
2.1.4 Τεχνική & Όργανο Μέτρησης Διηλεκτρικής Σταθεράς .....	25
2.2 Ηλεκτρομαγνητισμός .....	29
2.2.1 Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα .....	30
2.2.2 Ιονίζουσα Και Μη Ακτινοβολία .....	31
2.3 Στατιστικές Έννοιες .....	33
2.3.1 Μέση Τιμή $\mu$ .....	33
2.3.2 Τυπική Απόκλιση $\sigma$ .....	33
2.3.3 Συντελεστής Μεταβλητότητας CV .....	33
2.3.4 Κανονική Κατανομή (Γκαουσιανή Κατανομή) .....	34
2.4 Βιοιατρική Και Σύνθετα Υλικά .....	34
<b>Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Εργαστηριακός Εξοπλισμός</b> .....	
3.1 Εισαγωγή .....	38
3.1.1 Ατομικά Μέτρα Προστασίας .....	38
3.1.2 Εξοπλισμός Για Την Παρασκευή Των Δοκιμίων .....	39
3.2 Εξοπλισμός Μέτρησης Διηλεκτρικής Σταθεράς $\epsilon_r'$ .....	47
<b>Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Πειραματική Διαδικασία</b> .....	
4.1 Εισαγωγή .....	52
4.2 Αρχικό Πρωτόκολλο Δημιουργίας Δοκιμίων .....	52
4.3 Διαδικασία Συναρμολόγησης, Βαθμονόμησης & Πειραματικής Μέτρησης Διηλεκτρικής Σταθεράς $\epsilon_r'$ .....	56



<b>Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Ανάλυση Πειραματικών Αποτελεσμάτων &amp; Συμπεράσματα.....</b>	
5.1 Εισαγωγή .....	68
5.2 Αποτελέσματα Αρχικού Πρωτόκολλου .....	68
5.3 Ανάπτυξη Νέου Πρωτόκολλου.....	84
5.4 Έλεγχος Επαναληψιμότητας Νέου Πρωτόκολλου .....	94
5.5 Τρισδιάστατη Απεικόνιση Τιμών Διηλεκτρικής Σταθεράς $\epsilon_r$ ' .....	102
5.6 Εφαρμογές .....	105
5.6 Διάρκεια Ζωής Δοκιμίων.....	114
5.7 Συμπεράσματα, Περιορισμοί & Προτάσεις .....	118
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Δημιουργία σύνθετου υλικού .....	18
Εικόνα 2: Πλοίο Liberty S.S. Schenectady, όπου το 1943 απέτυχε πριν φύγει από το ναυπηγείο .....	19
Εικόνα 3: Πολωμένο και μη άτομο ή μόριο, αναλόγως της παρουσίας εξωτερικού ηλεκτρικού φορτίου .....	21
Εικόνα 4: Η σύνθετη διηλεκτρική επιτρεπτότητα του νερού συναρτήσεται της συχνότητας για θερμοκρασίες από 0 - 100°C. Οι συμπαγείς γραμμές απευθύνονται στο πραγματικό μέρος $\epsilon_r'$ , ενώ οι διακεκομμένες στο φανταστικό μέρος $\epsilon_r''$ .....	22
Εικόνα 5: Διάγραμμα σύνθετης διηλεκτρικής επιτρεπτότητας.....	22
Εικόνα 6: Μετάδοση σήματος ανίχνευσης καρκίνου του μαστού.....	23
Εικόνα 7: Διηλεκτρική σταθερά υλικών αναφοράς συναρτήσεται της συχνότητας.....	25
Εικόνα 8: Ομοαξονικός ανιχνευτής σε επαφή με εξεταζόμενα υλικά .....	26
Εικόνα 9: Σχηματική απεικόνιση ομοαξονικού καθετήρα ανοικτού άκρου .....	26
Εικόνα 10: (α) Μετρητικό σύστημα διηλεκτρικής σταθεράς. Στη θύρα του VNA (δεξιά) συνδέεται ένα καλώδιο, αυτό με τη σειρά του στον ομοαξονικό καθετήρα και ο καθετήρας μετράει το υγρό δείγμα. (β) Άνοψη και πλάγια τομή του αισθητήρα, με τον προσανατολισμό του ηλεκτρικού πεδίου .....	27
Εικόνα 11: Απόκλιση διηλεκτρικής σταθεράς υγρού επαλήθευσης (μεθανόλη), για εύρος συχνότητας 100 MHz – 3.000 MHz. Μέτρηση μεθανόλης σε θερμοκρασία (22 ± 2)°C. Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή δείχνει την αβεβαιότητα ως το ποσοστό της απόκλισης από την ονομαστική τιμή του υλικού αναφοράς. Αυτή η τιμή έχει υπολογιστεί από το εθνικό φυσικό εργαστήριο (NPL), το οποίο είναι το εθνικό ινστιτούτο μετρολογίας του Ηνωμένου Βασιλείου (NMI) .....	29
Εικόνα 12: Το φάσμα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων .....	30
Εικόνα 13: Διαχωρισμός ηλεκτρομαγνητικού φάσματος αναλόγως της συχνότητας.....	31
Εικόνα 14: Ιονίζουσα και μη ακτινοβολία στο εύρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.....	32
Εικόνα 15: Κατανομή Gauss. Αν τα δεδομένα μας περιγράφονται από αυτή την κατανομή, τότε έχουμε πιθανότητα 68,2%, η τιμή να βρίσκεται εντός του διαστήματος $\mu \pm \sigma$ . Αντίστοιχα, το διάστημα $\mu \pm 2\sigma$ περιέχει το 95,5 % των δεδομένων μας κλπ .....	34
Εικόνα 16: Ποσότητες ζελατίνης και νερού για τα 5 δείγματα.....	35
Εικόνα 17: Θεωρητική τιμή διηλεκτρικής σταθεράς 5 ιστών κεφαλιού και η διηλεκτρική σταθερά των 5 δειγμάτων ζελατίνης - νερού.....	35
Εικόνα 18: Πρότυπο ανθρωπόμορφο κεφάλι .....	36
Εικόνα 19: Παραγόμενο φάντομ γυναικείου στήθους. Το κίτρινο συνιστά το λίπος, το κόκκινο τους αδένες, το ανοιχτό πράσινο το εξωτερικό δέρμα και με μπλε έχουμε	

τον όγκο. (a) Εσωτερική όψη υγιούς στήθους. (b) Εξωτερική όψη εικόνας (a). (c) Γυναικείο στήθος με κακοήθεις μάζες κυττάρων.....	37
Εικόνα 20: Μέτρα ατομικής προστασίας.....	39
Εικόνα 21: Εργαστηριακός ζυγός Kern EMB 500-1 .....	40
Εικόνα 22: Θερμαντική πλάκα Ohaus Guardian 5000 .....	41
Εικόνα 23: Θερμόμετρο Checktemp HI-98501 .....	42
Εικόνα 24: Αναδευτήρας διαμέτρου 50 mm.....	42
Εικόνα 25: Λειτουργία & χειρισμοί αναδευτήρα.....	43
Εικόνα 26: Εργαστηριακή διάταξη αναδευτήρα.....	43
Εικόνα 27: Ποτήρι ζέσεως & πλαστικό ποτήρι .....	44
Εικόνα 28: Τεχνικά χαρακτηριστικά απορροφητήρα .....	44
Εικόνα 29: Απορροφητήρας εργαστηριακού χώρου .....	45
Εικόνα 30: Διάφορα χρήσιμα εργαλεία (πλαστικές πιπέτες, εργαστηριακά κυκλικά καλούπια, φιλμ σφράγισης, αλουμινόχαρτο).....	46
Εικόνα 31: Μεταλλικές εργαστηριακές σπάτουλες .....	46
Εικόνα 32: Υλικά για τη δημιουργία σύνθετου υλικού .....	47
Εικόνα 33: Διανυσματικός αναλυτής δικτυωμάτων Anritsu (VNA).....	48
Εικόνα 34: Εξωτερικός υπολογιστής Dell .....	48
Εικόνα 35: Κιτ διηλεκτρικής αξιολόγησης SPREAG.....	49
Εικόνα 36: Καλώδιο σταθερότητας Stability™ SC-35-MM-48.....	50
Εικόνα 37: Ανατομία καλωδίου σταθεροποίησης .....	51
Εικόνα 38: Απαιτούμενος εξοπλισμός για τη βαθμονόμηση του VNA και για τις μετρήσεις διηλεκτρικής σταθεράς ε <sub>r</sub> ' .....	51
Εικόνα 39: Αρχική θερμοκρασία .....	53
Εικόνα 40: Ανάμειξη απιονισμένου νερού & ζελατίνης.....	54
Εικόνα 41: Ανάμειξη στους 75°C για 6' .....	54
Εικόνα 42: Προσθήκη & ανάμειξη σιλικόνης στο μείγμα.....	55
Εικόνα 43: Μέτρηση & προσθήκη καταλύτη στο μείγμα.....	55
Εικόνα 44: Έγχυση εξεταζόμενου υλικού στο κυκλικό καλούπι.....	56
Εικόνα 45: Σφράγιση & τοποθέτηση στο ψυγείο .....	56
Εικόνα 46: Σύστημα μέτρησης & βοηθητικά εργαλεία.....	57
Εικόνα 47: Εκκίνηση VNA.....	57
Εικόνα 48: Συγκράτηση ανιχνευτή (probe) .....	58

Εικόνα 49: Σύνδεση θηλυκού βύσματος.....	58
Εικόνα 50: Σύνδεση καλωδίου σταθερότητας .....	59
Εικόνα 51: Τελικό σύστημα μέτρησης .....	59
Εικόνα 52: Εξοπλισμός διόρθωσης σφάλματος θύρας .....	60
Εικόνα 53: Περιβάλλον εφαρμογής ShockLine.....	60
Εικόνα 54: Περιβάλλον εφαρμογής DAK .....	61
Εικόνα 55: Θερμοκρασία πρότυπου υλικού (απιονισμένο νερό) & εκκίνηση βαθμονόμησης .....	61
Εικόνα 56: Εφαρμογή λωρίδας χαλκού στον ανιχνευτή.....	62
Εικόνα 57: Βαθμονόμηση Short Circuit .....	62
Εικόνα 58: Βύθιση ομοαξονικού ανιχνευτή .....	63
Εικόνα 59: Βαθμονόμηση Liquid-Load Circuit.....	63
Εικόνα 60: Ελεύθερος ομοαξονικός ανιχνευτής.....	64
Εικόνα 61: Βαθμονόμηση Open Circuit .....	64
Εικόνα 62: Σάρωση ανιχνευτή .....	65
Εικόνα 63: Μέτρηση ηλεκτρικών χαρακτηριστικών αέρα .....	65
Εικόνα 64: Μπροστινή και οπίσθια όψη εξεταζόμενου υλικού.....	66
Εικόνα 65: Μέτρηση ε' του εξεταζόμενου υλικού .....	67
Εικόνα 66: Εξαγωγή δεδομένων ε' του εξεταζόμενου υλικού .....	67
Εικόνα 67: 1 <sup>η</sup> σειρά δοκιμών αρχικού πρωτόκολλου .....	69
Εικόνα 68: «Υπερβολικό» σκίτσο για τη μέτρηση 3 <sup>ου</sup> μείγματος της 1 <sup>ης</sup> σειράς δοκιμών αρχικού πρωτόκολλου .....	70
Εικόνα 69: Εμφάνιση 2 <sup>ης</sup> σειράς δοκιμών αρχικού πρωτόκολλου .....	73
Εικόνα 70: Μείγμα 1 της 2 <sup>ης</sup> σειράς δοκιμών του αρχικού πρωτόκολλου .....	73
Εικόνα 71: 3 <sup>η</sup> σειρά δοκιμών καλούπια αρχικού πρωτόκολλου.....	75
Εικόνα 72: Σταγόνες σιλικόνης στο καλούπι του μείγματος 1 & μορφή του μείγματος 4.....	76
Εικόνα 73: Προεξοχή του μείγματος 3 της 1 <sup>ης</sup> σειράς αρχικού πρωτόκολλου .....	80
Εικόνα 74: Κολημένη σιλικόνη στη μετρούμενη επιφάνεια του μείγματος 1 της 2 <sup>ης</sup> σειράς αρχικού πρωτόκολλου .....	80
Εικόνα 75: Προεξοχή του μείγματος 2 της 3 <sup>ης</sup> σειράς αρχικού πρωτόκολλου .....	80
Εικόνα 76: Δοκιμαστικό δοκίμιο mix B .....	85
Εικόνα 77: Δοκιμαστικό δοκίμιο I.....	87
Εικόνα 78: Δοκιμαστικό δοκίμιο II .....	88
Εικόνα 79: Πρώτα 7 εξεταζόμενα δοκίμια με βάση 5 αναπτυσσόμενα πρωτόκολλα .....	89

Εικόνα 80: Εξεταζόμενα δοκίμια VIII, VIV, X, XI.....	90
Εικόνα 81: Κάτω επιφάνεια καλουπιών δοκιμίων VIII, VIV παραγόμενα από το ίδιο πρωτόκολλο .....	90
Εικόνα 82: Κάτω επιφάνεια καλουπιών δοκιμίων X, XI παραγόμενα από το ίδιο πρωτόκολλο .....	91
Εικόνα 83: Εξεταζόμενα δοκίμια XII, XII, XIV & XV.....	92
Εικόνα 84: Κάτω επιφάνεια καλουπιού για τα εξεταζόμενα δοκίμια XII, XII, XIV & XV.....	93
Εικόνα 85: Ηλεκτρονικός αναδευτήρας στα 600 rpm .....	94
Εικόνα 86: Μετρούμενη επιφάνεια δοκιμίων, αναλογίας 6:1 για όλες τις μέρες .....	96
Εικόνα 87: Δοκιμαστικά δοκίμια, αναλογίας 1,5:1, για 3 διαφορετικές μέρες.....	97
Εικόνα 88: Δοκιμαστικά δοκίμια, αναλογίας 3:1, για 3 διαφορετικές μέρες.....	98
Εικόνα 89: Δοκιμαστικά δοκίμια, αναλογίας 4,5:1, για 3 διαφορετικές μέρες.....	99
Εικόνα 90: Εύρος απαιτούμενης αναλογίας νερού – σιλικόνης σύνθετου υλικού με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon'_{TARGET 1} = 20$ .....	106
Εικόνα 91: Τομή εξίσωσης μαθηματικού μοντέλου καινούργιου πρωτόκολλου με τον άξονα x'x για τιμή $f(x) = \epsilon'_{TARGET 1} = 20$ .....	108
Εικόνα 92: Δοκίμιο με τιμή στόχου $\epsilon'_{TARGET 1}$ .....	109
Εικόνα 93: Διαστρωμάτωση κεραίας στο σύνθετο υλικό.....	109
Εικόνα 94: Εύρος απαιτούμενης αναλογίας νερού – σιλικόνης σύνθετου υλικού με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon'_{TARGET 2} = 42$ .....	110
Εικόνα 95: Τομή εξίσωσης μαθηματικού μοντέλου καινούργιου πρωτόκολλου με τον άξονα x'x για τιμή $f(x) = \epsilon'_{TARGET 2} = 42$ .....	112
Εικόνα 96: Δοκίμιο με τιμή στόχο $\epsilon'_{TARGET 2}$ .....	113
Εικόνα 97: Καλούπι ανθρώπινου κεφαλιού με τιμή στόχο $\epsilon'_{TARGET 2}$ .....	113
Εικόνα 98: 1 <sup>η</sup> μέρα της 1 <sup>ης</sup> σειράς δοκιμίων.....	114
Εικόνα 99: Δοκίμια 1 <sup>ης</sup> σειράς 1 εβδομάδα μετά τη δημιουργία τους.....	114
Εικόνα 100: Δοκίμιο mix 2 της 1 <sup>ης</sup> σειράς, 2 εβδομάδες μετά τη δημιουργία του...	115
Εικόνα 101: Δοκίμια 1 <sup>ης</sup> σειράς, 3 εβδομάδες μετά τη δημιουργία τους.....	115
Εικόνα 102: Ανομοιογενές μείγμα & επικαθίσεις σιλικόνης.....	118
Εικόνα 103: Βάθος ηλεκτρικού αναδευτήρα .....	119
Εικόνα 104: Μικρές «τρυπούλες» στην επάνω επιφάνεια του δοκιμίου .....	119
Εικόνα 105: Αύξηση θερμοκρασίας θερμαινόμενης επιφάνειας .....	121
Εικόνα 106: Δοκίμιο με μούχλα .....	121

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα σύνθετων υλικών .....	20
Πίνακας 2: Διηλεκτρική σταθερά υλικών για στατικά ηλεκτρικά πεδία .....	24
Πίνακας 3: Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα μεθόδου ομοαξονικού καθετήρα .....	26
Πίνακας 4: Τα συνήθη σφάλματα ή παράγοντες σύγχυσης που συμβαίνουν σε κάθε βήμα της διαδικασίας βαθμονόμησης, καθώς και πιθανές μέθοδοι διόρθωσης ή αντιστάθμισης .....	28
Πίνακας 5: Τεχνικά χαρακτηριστικά θερμομέτρου μέτρησης .....	41
Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά εξωτερικού υπολογιστή συγκριτικά με τα απαιτούμενα .....	48
Πίνακας 7: Τεχνικά χαρακτηριστικά ανιχνευτή DAK 12 .....	49
Πίνακας 8: Τεχνικά χαρακτηριστικά καλωδίου ευστάθειας Stability SC-35-MM-48 .....	50
Πίνακας 9: Μείγματα προς ανάλυση .....	53
Πίνακας 10: 1 <sup>η</sup> σειρά μετρήσεων αρχικού πρωτόκολλου .....	68
Πίνακας 11: Σημαντικές αναλογίες και διηλεκτρική σταθερά 1 <sup>ης</sup> σειράς μετρήσεων .....	69
Πίνακας 12: 2 <sup>η</sup> σειρά δοκιμών αρχικού πρωτόκολλου .....	72
Πίνακας 13: Αναλογίες και διηλεκτρική σταθερά 2 <sup>ης</sup> σειράς δοκιμών αρχικού πρωτόκολλου .....	72
Πίνακας 14: 3 <sup>η</sup> σειρά δοκιμών αρχικού πρωτόκολλου .....	74
Πίνακας 15: Αναλογίες και διηλεκτρική σταθερά 3 <sup>ης</sup> σειράς δοκιμών αρχικού πρωτόκολλου .....	75
Πίνακας 16: Διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r$ για όλες τις σειρές δοκιμών του αρχικού πρωτόκολλου .....	77
Πίνακας 17: Στατιστικά μεγέθη μείγματος 1 αρχικού πρωτόκολλου .....	77
Πίνακας 18: Στατιστικά μεγέθη μείγματος 2 αρχικού πρωτόκολλου .....	77
Πίνακας 19: Στατιστικά μεγέθη μείγματος 3 αρχικού πρωτόκολλου .....	78
Πίνακας 20: Στατιστικά μεγέθη μείγματος 4 αρχικού πρωτόκολλου .....	78
Πίνακας 21: Απομακρυσμένες τιμές σειρών δοκιμών .....	79
Πίνακας 22: Στατιστικά μεγέθη μείγματος 1, δίχως την απομακρυσμένη τιμή .....	81
Πίνακας 23: Στατιστικά μεγέθη μείγματος 2, δίχως την απομακρυσμένη τιμή .....	81
Πίνακας 24: Στατιστικά μεγέθη μείγματος 3, δίχως την απομακρυσμένη τιμή .....	81
Πίνακας 25: Στατιστικά μεγέθη μείγματος 4, δίχως την απομακρυσμένη τιμή (δεν υπάρχει) .....	82
Πίνακας 26: Δοκιμαστικό δοκίμιο mix B .....	84

Πίνακας 27: Δοκιμαστικό δοκίμιο I.....	86
Πίνακας 28: Δοκιμαστικό δοκίμιο II .....	87
Πίνακας 29: Δοκιμαστικό δοκίμιο αναλογίας 6:1, για όλες τις μέρες.....	95
Πίνακας 30: Αναλογίες & τιμή $\epsilon_r$ δοκιμίων αναλογίας 6:1 για όλες τις μέρες.....	95
Πίνακας 31: Διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r$ δοκιμίων αναλογίας 6:1 για το νέο πρωτόκολλο .....	96
Πίνακας 32: Αναλογίες & τιμή $\epsilon_r$ δοκιμίων αναλογίας 1,5:1 για όλες τις μέρες.....	97
Πίνακας 33: Διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r$ δοκιμίων αναλογίας 1,5:1 για το νέο πρωτόκολλο .....	97
Πίνακας 34: Αναλογίες & τιμή $\epsilon_r$ δοκιμίων αναλογίας 3:1 για όλες τις μέρες.....	98
Πίνακας 35: Διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r$ δοκιμίων αναλογίας 3:1 για το νέο πρωτόκολλο .....	98
Πίνακας 36: Αναλογίες & τιμή $\epsilon_r$ δοκιμίων αναλογίας 4,5:1 για όλες τις μέρες.....	99
Πίνακας 37: Διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r$ δοκιμίων αναλογίας 4,5:1 για το νέο πρωτόκολλο .....	99
Πίνακας 38: Τιμές διηλεκτρικής σταθεράς ανά 25 MHz για αναλογία απιονισμένου νερού – σιλικόνης ίση με 1,5 (1 <sup>η</sup> σειρά δοκιμίου – νέο πρωτόκολλο).....	102
Πίνακας 39: Μέση τιμή διηλεκτρικής σταθεράς ανά 25 MHz για αναλογία απιονισμένου νερού – σιλικόνης ίση με 1,5 (χρήση 3 σειρών δεδομένων – νέο πρωτόκολλο).....	103
Πίνακας 40: Υπολογισμός υπόλοιπων χρήσιμων στατιστικών εννοιών ανά 25 MHz για αναλογία απιονισμένου νερού – σιλικόνης ίση με 1,5 και έλεγχος αν CV < 5%. (χρήση 3 σειρών δεδομένων – νέο πρωτόκολλο) .....	103
Πίνακας 41: Τελική τιμή $\epsilon_r$ διηλεκτρικής στρώσης κεραίας συγκριτικά με την τιμή στόχο $\epsilon_r$ TARGET 1 .....	108
Πίνακας 42: Τελική τιμή $\epsilon_r$ δοκιμίου ανθρώπινου εγκεφάλου συγκριτικά με την τιμή στόχο $\epsilon_r$ TARGET 2 .....	112
Πίνακας 43: Διάρκεια ζωής κάθε σειράς δοκιμίων με ημερομηνίες.....	116

## Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r$ ' δοκιμίων 1 <sup>η</sup> σειράς δοκιμίων αρχικού πρωτόκολλου .....	71
Διάγραμμα 2: Διηλεκτρική σταθερά δοκιμίων $\epsilon_r$ ' 2 <sup>η</sup> σειράς δοκιμίων .....	74
Διάγραμμα 3: Διηλεκτρική σταθερά δοκιμίων $\epsilon_r$ ' 3 <sup>η</sup> σειράς δοκιμίων αρχικού πρωτόκολλου .....	76
Διάγραμμα 4: Μαθηματικό μοντέλο διηλεκτρικής σταθεράς $\epsilon_r$ ' σύνθετου υλικού με βάση όλες τις πειραματικές τιμές (αρχικό πρωτόκολλο).....	78
Διάγραμμα 5: Μαθηματικό μοντέλο διηλεκτρικής σταθεράς $\epsilon_r$ ' σύνθετου υλικού με αποκλεισμό απομακρυσμένων τιμών.....	82
Διάγραμμα 6: Σύγκριση μαθηματικών μοντέλων διηλεκτρικής σταθεράς $\epsilon_r$ ' σύνθετου υλικού με όλες τις τιμές και τον αποκλεισμό τιμής .....	83
Διάγραμμα 7: Αποδεκτό μαθηματικό μοντέλο διηλεκτρικής σταθεράς $\epsilon_r$ ' σύνθετου υλικού, με βάση το νέο πρωτόκολλο .....	100
Διάγραμμα 8: Σύγκριση αρχικού & τελικού πρωτόκολλου με τις γραμμές σφαλμάτων τους .....	101
Διάγραμμα 9: Τρισδιάστατη επιφάνεια για την εύρεση ιδιοτήτων σύνθετου υλικού.....	104
Διάγραμμα 10: Κάτοψη τρισδιάστατης επιφάνειας .....	105
Διάγραμμα 11: Διάρκεια ζωής για την 1 <sup>η</sup> σειρά δοκιμίων.....	116
Διάγραμμα 12: Διάρκεια ζωής για την 2 <sup>η</sup> σειρά δοκιμίων.....	117
Διάγραμμα 13: Διάρκεια ζωής για την 3 <sup>η</sup> σειρά δοκιμίων.....	117



# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Εισαγωγή

## 1.1 Σκοπός Εργασίας

Για τη μελέτη και αντιμετώπιση των ασθενειών, επιθυμούμε να κατασκευάσουμε και να χρησιμοποιούμε ιατρικές συσκευές απεικόνισης σε ανθρώπινους οργανισμούς για ανίχνευση επιβλαβών ιστών, δίχως να φέρνουμε σε επικίνδυνη κατάσταση την υγεία του εξεταζόμενου ατόμου. Κατανοούμε ότι η ακρίβεια μιας ιατρικής εξέτασης είναι ένας κύριος παράγοντας για την αποδοχή ή όχι ενός πρωτότυπου μηχανήματος που αναπτύσσεται. Επομένως, είναι αναγκαίο πρώτα να δοκιμάσουμε οποιαδήποτε μηχανισμό σε εργαστηριακές συνθήκες. Το μόνο που μας λείπει είναι ένα δοκίμιο/εξεταζόμενο υλικό με γνωστές ιδιότητες που θα υποστεί πειραματικό έλεγχο και θα μας επιβεβαιώσει τη λειτουργικότητα μίας συσκευής. Ο τρόπος δημιουργίας ενός σύνθετου υλικού με σχεδιασμένες ιδιότητες είναι η βασική ασχολία μας. Αρχικά, ο φοιτητής ασχολείται με τη μελέτη και πειραματική ανάλυση ιδιοτήτων ενός σύνθετου υλικού. Το προσωπικό της εταιρείας Metamaterial, μας καλωσορίζει στον εργαστηριακό της χώρο και μας επιδεικνύει τον πειραματικό εξοπλισμό, τα μέτρα ασφαλείας καθώς και την πειραματική διαδικασία. Ακολουθεί η δημιουργία σύνθετου υλικού που αποτελείται από 4 γνωστά υλικά : απιονισμένο νερό, ζελατίνη χοίρου σε σκόνη, λάστιχο σιλικόνης και καταλύτης. Ύστερα, μετριοούνται οι ηλεκτρικές ιδιότητες των πειραματικών δοκιμίων και πιο συγκεκριμένα, της διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r'$ . Μέσω των μετρήσεων, αναπτύσσονται πειραματικά μοντέλα και γραφικές παραστάσεις με βάση τη διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r'$ , τη συχνότητα  $f$  και την αναλογία απιονισμένου νερού-σιλικόνης. Παράλληλα, μελετάμε τη διάρκεια ζωής των καλουπιών και τις αλλαγές που προκύπτουν στις ιδιότητες τους. Στη συνέχεια, προσαρμόζουμε και οριστικοποιούμε καινούργιο πρωτόκολλο κατασκευής καλουπιών. Μεταβάλλουμε τη θερμοκρασία  $T$ , τον τρόπο ανάδευσης καθώς και το συνολικό χρόνο  $t$  της πειραματικής διαδικασίας. Αναπτύσσουμε παραπάνω από 10 νέα πειραματικά μοντέλα, κατασκευάζουμε και μετράμε τις ιδιότητες 15 δοκιμίων, με σκοπό να καταλήξουμε στο καλύτερο δυνατό πρωτόκολλο. Τέλος, ορίζουμε 2 συγκεκριμένες τιμές στόχου διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r'$ , με εφαρμογή στην κατασκευή ανθρώπινων ομοιωμάτων & διαστρωμάτωσης κεραίων. Από τη μαθηματική εξίσωση του αναπτυγμένου πρωτοκόλλου, βρίσκουμε την απαιτούμενη αναλογία νερού-σιλικόνης και μελετάμε αν τα δείγματα μας έχουν ίδια τιμή  $\epsilon_r'$ , με την σχεδιαζόμενη. Καταλήγουμε ότι οι μετρούμενες πειραματικές τιμές είναι παραπλήσιες των επιθυμητών, οπότε μένουμε αρκετά ικανοποιημένοι και καθιερώνουμε τη λειτουργικότητα του νέου μοντέλου. Με αυτόν τον τρόπο, καταφέρνουμε να παράγουμε σύνθετα υλικά, με σχεδιασμένη τιμή διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r'$  και υποστηρίζουμε έμμεσα τη δημιουργία νέων συσκευών απεικόνισης ιατρικής χρήσης καθώς θα προσπαθούν να επαληθεύσουν τις ήδη γνωστές τιμές  $\epsilon_r'$ , σύνθετων υλικών που έχουν παραχθεί από το νέο πρωτόκολλο.

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Βασική Βιβλιογραφία

### 2.1 Τι Είναι Τα Σύνθετα Υλικά

Σε μοριακό επίπεδο, η δομή των διαφόρων κοινών υλικών όπως τα μέταλλα, τα κεραμικά και τα πολυμερή είναι καίριας σημασίας στον καθορισμό των μοναδικών ιδιοτήτων τους. Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες αυτών των υλικών επηρεάζονται άμεσα από τη μοριακή τους σύνθεση, η οποία επηρεάζει μεγέθη όπως την αντοχή τους, την αγωγιμότητα τους και γενικότερα τη συμπεριφορά τους, υπό διάφορες συνθήκες.

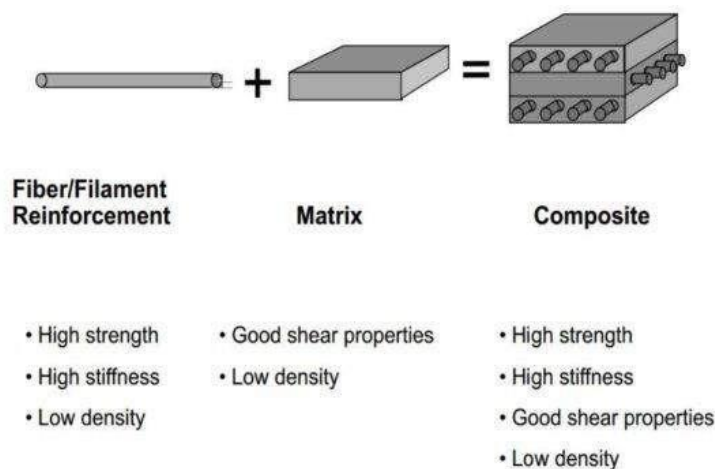
Πολλές φορές, οι ιδιότητες ενός υλικού από μόνες τους δεν είναι αρκετές για να δώσουν λύση σε διάφορες εφαρμογές. Για την κατασκευή ενός υποστρώματος κτηριακού κελύφους, ως υλικό επιλογής θα προτιμήσουμε ένα κράμα σιδήρου-άνθρακα (Fe-C, χάλυβας) και όχι αποκλειστικά σκέτο σίδηρο Fe. Η απάντηση στο γιατί είναι ότι επιτυγχάνουμε καλύτερες ιδιότητες καθώς με την προσθήκη άλλων υλικών στοιχείων όπως άνθρακα C, μαγγάνιο Mn, πυρίτιο Si κλπ. στον σίδηρο, αυξάνουμε την αριθμητική τιμή του ορίου διαρροής και εφελκυσμού του. Αυτό σημαίνει ότι έχουμε ένα πιο στιβαρό υποστύλωμα, που μπορεί να δεχθεί μεγαλύτερες εξωτερικές φορτίσεις. Άρα, αναμιγνύουμε διάφορα υλικά μεταξύ τους, με σκοπό να λάβουμε ένα καλύτερο/πιο επιθυμητό τελικό αποτέλεσμα.

Ο ορισμός που επισυνάπτουμε στο σύνθετο υλικό είναι ο ακόλουθος:

«Ένα σύνθετο υλικό είναι μία υλική δομή που αποτελείται από τουλάχιστον δύο μακροσκοπικά αναγνωρίσιμα υλικά που συνεργάζονται για την επίτευξη ενός καλύτερου αποτελέσματος» (R.P.L. Nijssen, 2015).

Τα περισσότερα σύνθετα υλικά αποτελούνται από 2 κυρίως υλικά, το ένα ορίζεται ως υλικό μήτρα και το άλλο ως υλικό ενίσχυσης/ίνες. Οι ευνοϊκές ιδιότητες των ινών και της μήτρας εκμεταλλεύονται στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό, ενώ οι δυσμενείς ιδιότητες του ενός συστατικού αντισταθμίζονται από το άλλο συστατικό όσο το δυνατόν περισσότερο. Επομένως, επιτυγχάνεται μία δομή που δεν θα μπορούσε να έχει επιτευχθεί με κανένα από τα 2 υλικά ξεχωριστά (R.P.L. Nijssen, 2015).

Οι ίνες/οπλισμός γενικά θεωρούνται το υλικό ενίσχυσης, αυτό δηλαδή που θα φέρει το φορτίο ενώ η μήτρα είναι το υλικό που συνδέει τα πάντα μαζί. Η μήτρα είναι το υλικό συνεχής φάσης ενώ οι ίνες είναι το υλικό διεσπαρμένης φάσης (CKN, 2021).



Εικόνα 1: Δημιουργία σύνθετου υλικού (Yadav Khagendra Kumar & Dr. Dalbir Singh Lohchab, 2016)

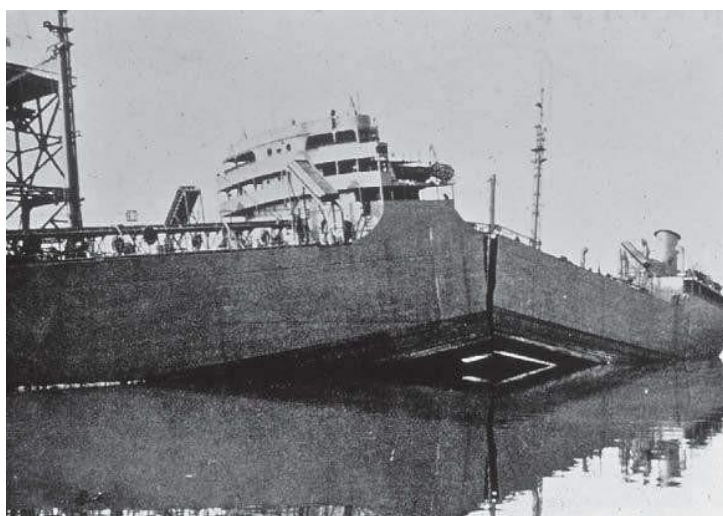
Τα σύνθετα υλικά δεν δημιουργούνται μόνο από τον άνθρωπο αλλά υπάρχουν αυθαίρετα στη φύση. Το ξύλο είναι από μόνο του ένα σύνθετο υλικό που αποτελείται από ένα είδος πολυμερούς – ίνες κυτταρίνης με καλή αντοχή και ακαμψία- σε μία μήτρα ενός άλλου πολυμερούς, του πολυσακχαρίτη λιγνίνη. Ωστόσο, μελετώντας τη μορφή του ξύλου και τις μηχανικές του ιδιότητες, καταλήξαμε ότι αυτό είναι ανισότροπο δηλαδή ότι παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά ανάλογα την κατεύθυνση που του ασκείται εξωτερική δύναμη.

Από πολύ παλιά, ο άνθρωπος είχε καταλάβει ότι ο συνδυασμός υλικών μπορούσε να επιφέρει πολλαπλά πλεονεκτήματα. Όταν ζητούνταν από εκείνον να προσκολλήσει υλικά μεταξύ τους, ανακάτευε νερό με χρώμα και χρησιμοποιούσε το γνωστό παχύρευστο υγρό, την λάσπη. Με την επιστημονική εξέλιξη και πειραματισμούς, καταλήξαμε στα σημερινά οπλισμένα σκυροδέματα.

Εμείς θέλουμε να παράγουμε τεχνικά υλικά, τα οποία θα έχουν γνωστές ιδιότητες που μπορούν να αναπαραχθούν. Αρκετές φορές, αυτές οι ιδιότητες έχουν τη δυνατότητα να προβλεφθούν με ικανοποιητικό βαθμό από μαθηματικά μοντέλα (Bryan Harris, 1999).

### **2.1.1 Πλεονεκτήματα Και Μειονεκτήματα Σύνθετων Υλικών**

Τα τελευταία χρόνια έχουμε καταφέρει να αντιληφθούμε καλύτερα τα σύνθετα υλικά, λόγω της ανάπτυξης της επιστήμης και της τεχνολογίας που τα περιβάλλουν. Ωστόσο, πολλά καθημερινά υλικά που σήμερα μας φαίνονται απλά, κάποτε θεωρούνταν ως επαναστατικά. Στο παρελθόν, η κατασκευή των πλοίων από το ξύλο επέτρεψε στους ανθρώπους να πορευτούν τους ωκεανούς για να ανακαλύψουν τον κόσμο. Οι ανάγκες που δημιουργούνταν στην κοινωνία, επέτρεπαν στην υιοθέτηση νέων υλικών με συγκεκριμένες ιδιότητες όπως υψηλή αντοχή σε θραύση, ελαστικότητα κλπ. καθώς και σε νέες μεθόδους κατασκευής. Παρ' όλα αυτά, τα υπολογιστικά μοντέλα και οι μέθοδοι σχεδιασμού ποτέ δεν ήταν και δεν θα είναι τέλειοι. Κατά τη διάρκεια του 2<sup>ου</sup> Παγκοσμίου πολέμου, πλοία (Liberty ships) που μετέφεραν φορτίο βυθιζόντουσαν από απροσδόκητες θραύσεις. Αυτά είχαν προκύψει μέσω συγκόλλησης των μερών του, όπου και παρουσιάζονταν ψαθυρά ρήγματα λόγω της χαμηλής ανθεκτικότητας του χάλυβα σε χαμηλές θερμοκρασίες στο σημείο συγκόλλησης.



Εικόνα 2: Πλοίο Liberty S.S. Schenectady, όπου το 1943 απέτυχε πριν φύγει από το ναυπηγείο (Earl R. Parker, Brittle Behavior of Engineering Structures, National Academy of Sciences, National Research Council, John Wiley & Sons, New York, 1957, όπως αναφέρεται στο Muhammad Arshad, 2015, Liberty Ship Failures)

Πιθανά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σύνθετων υλικών αναφέρονται παρακάτω:

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Εξοικονόμηση βάρους	Υψηλό κόστος υλικών
Σχεδιασμός μηχανικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων	Μερικές φορές απαιτούνται προχωρημένες υπολογιστικές μέθοδοι
Ανθεκτικότητα	Περιορισμένη γνώση σχετικά με τη δομική τους συμπεριφορά και τη μέθοδο σύνδεσης
Χαμηλό συνολικό κόστος συντήρησης	Μπορεί να έχουμε ανεπιθύμητη συμπεριφορά δυσκαμψίας και μηχανικής αστοχίας
Πιθανή αυτοματοποιημένη κατασκευή	Δεν είναι αναπτυγμένος ο τρόπος ανακύκλωσης των υλικών

Πίνακας 1: Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα σύνθετων υλικών (R.P.L. Nijssen, 2015).

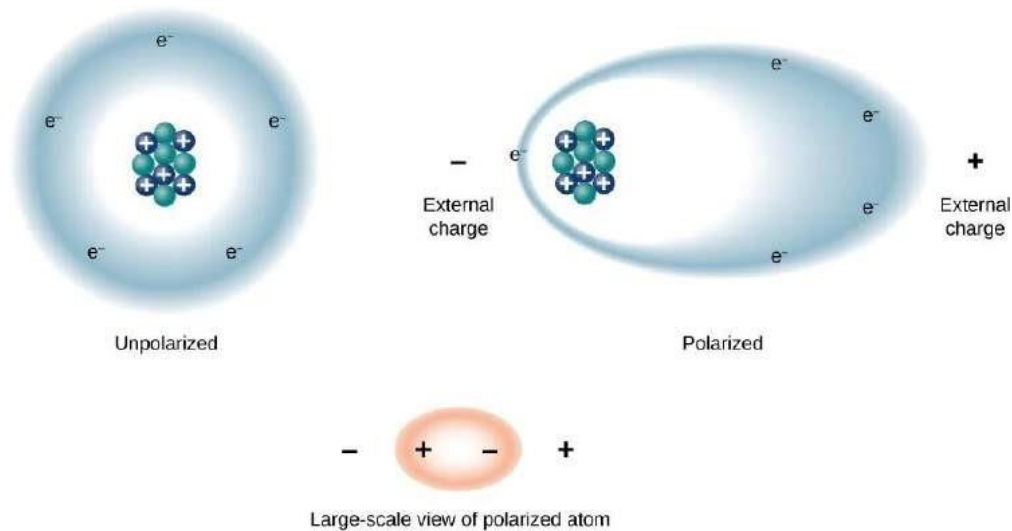
### 2.1.2 Διηλεκτρικά Υλικά

Υπάρχουν πολλαπλοί τρόποι διαχωρισμού των υλικών, εμείς εφόσον θα μελετήσουμε τη διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r$  τους, κάνουμε μία μικρή εισαγωγή στα διηλεκτρικά υλικά.

Τα 2 κύρια υλικά (απιονισμένο νερό & λάστιχο σιλικόνης) που αποτελούν το σύνθετο υλικό μας, μπορούν να θεωρηθούν ως διηλεκτρικά υλικά.

Τα διηλεκτρικά είναι υλικά που δεν επιτρέπουν την ελεύθερη κίνηση των ηλεκτρονίων τους δηλαδή δεν άγουν ηλεκτρικό ρεύμα, οπότε μπορούν να θεωρηθούν και ως μονωτές. Ωστόσο, μία σημαντική διαφορά από τους μονωτές, είναι ότι τα άτομα των διηλεκτρικών πολώνονται όταν εφαρμόζεται ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο.

Με απλά λόγια, η πόλωση είναι ο διαχωρισμός των θετικών και αρνητικών φορτίων εντός του ατόμου, με βάση την τοποθέτηση ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Τα ηλεκτρόνια απλώς μετατοπίζονται καθώς δεν σπάνε οι δεσμοί τους. Άμα, έχουμε έναν εξωτερικό αρνητικό και θετικό πόλο, τα ηλεκτρονίων  $e^-$  του ατόμου, επιθυμούν να μετατοπιστούν στην περιοχή του θετικού πόλου. Επομένως, το άτομο θα έχει από τη μία πλευρά παραπάνω αρνητικό φορτίο, ενώ η άλλη του πλευρά θα αποκτήσει θετικό πρόσημο.



Εικόνα 3: Πολωμένο και μη άτομο ή μόριο, αναλόγως της παρουσίας εξωτερικού ηλεκτρικού φορτίου (Samuel J.Ling, William Moebs & Jeff Sanny, 2016).

Επομένως, τα διηλεκτρικά υλικά έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια και παράλληλα κάποιο μέρος της ενέργειας να διαχέεται. Η τελευταία ονομάζεται ως διηλεκτρική απώλεια και όσο μικρότερη είναι τόσο πιο αποτελεσματικό θεωρείται το διηλεκτρικό υλικό (Rahul Awati, 2022).

Παραδείγματα διηλεκτρικών υλικών:

Στερεά διηλεκτρικά: Πλαστικό, κεραμικά, γυαλί

Υγρά διηλεκτρικά: Αποσταγμένο νερό

Αέρια διηλεκτρικά: Κενό, άζωτο (N), ήλιο (He)

**2.1.3 Σύνθετη Διηλεκτρική Επιτρεπτότητα  $\epsilon^*/\epsilon_r$  (Complex Permittivity)**

Εμείς από τις πολλές ιδιότητες των υλικών, θα αποδώσουμε το ενδιαφέρον μας στη διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r'$ , η οποία αποτελεί μέρος της σύνθετης διηλεκτρικής επιτρεπτότητας  $\epsilon^*$ .

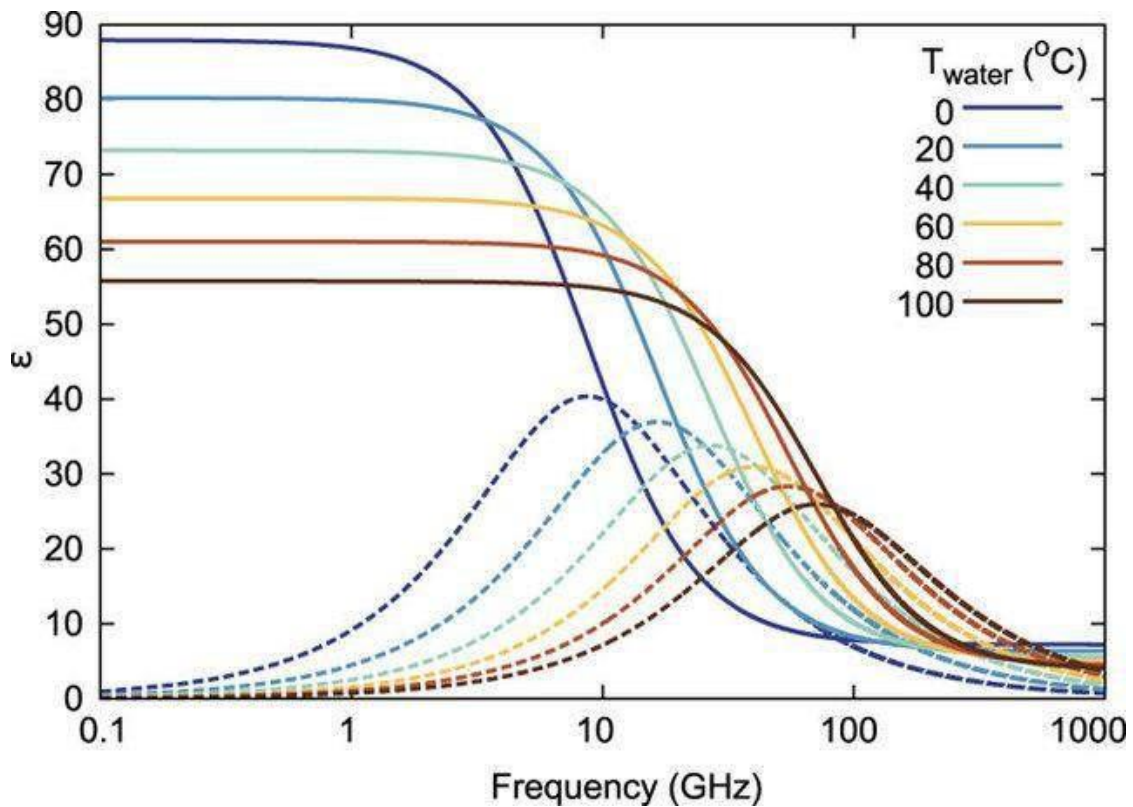
Η σύνθετη διηλεκτρική επιτρεπτότητα  $\epsilon^*$  είναι μιγαδικός αριθμός και ισούται με :

$$\epsilon^* = \epsilon_r' - j^* \epsilon_r'' \text{ , όπου :}$$

$\epsilon_r'$  – Θεωρείται το πραγματικό μέρος, ονομάζεται διηλεκτρική σταθερά ή διηλεκτρική επιτρεπτότητα και είναι ένα μέτρο για το πόση ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί στο υλικό όταν εφαρμόζεται εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο.

$j$  – Η φανταστική μονάδα και  $j^2 = -1$

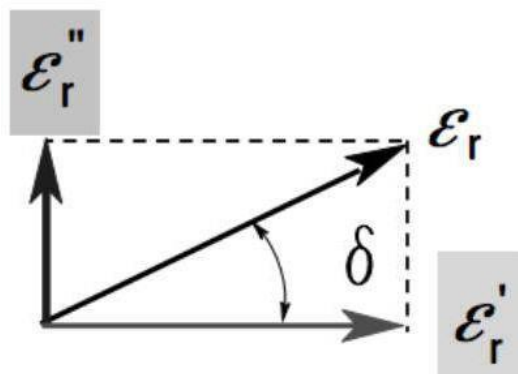
$\epsilon_r''$  – Θεωρείται το φανταστικό μέρος, ονομάζεται συντελεστής απωλειών και αντιπροσωπεύει πόση ενέργεια διαχέεται/χάνεται δηλαδή πόσες είναι οι διηλεκτρικές απώλειες, όταν εφαρμόζεται εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο.



Εικόνα 4: Η σύνθετη διηλεκτρική επιτρεπτότητα του νερού συναρτίζεται της συχνότητας για θερμοκρασίες από 0 - 100°C. Οι συμπαγείς γραμμές απευθύνονται στο πραγματικό μέρος  $\epsilon_r'$ , ενώ οι διακεκομμένες στο φανταστικό μέρος  $\epsilon_r''$  (Andrei Andryieuski, Svetlana Kuznetsova, Sergei V. Zhukovsky, Yuri Kivshar & Andrei V. Lavrinenko, 2015).

Να σημειωθεί ότι η σύνθετη διηλεκτρική επιτρεπτότητα  $\epsilon^*$  εξαρτάται από τη γωνιακή συχνότητα  $\omega$  και κατά συνέπεια από τη συχνότητα  $f$ . Επίσης, μεταβάλλεται και από τη θερμοκρασία του μέσου, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.

Όταν θέλουμε να σχεδιάσουμε ως διάνυσμα τη σύνθετη διηλεκτρική επιτρεπτότητα  $\epsilon^*$ , το πραγματικό και το φανταστικό μέρος έχουν διαφορά φάσης κατά 90°.



Εικόνα 5: Διάνυσμα σύνθετης διηλεκτρικής επιτρεπτότητας (Oliver Riera & Bartomeu, 2016).

Ο λόγος της χαμένης ενέργειας  $\epsilon_r''$  προς την αποθηκευμένη ενέργεια  $\epsilon_r'$ , ονομάζεται συντελεστής διασποράς ή εφαπτομένη απωλειών  $\tan(\delta)$ .

$$\tan(\delta) = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} = \frac{\sigma}{\omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r'}$$

$\sigma$  : αγωγιμότητα του μέσου (S/m)

$\epsilon_0$  : Η διηλεκτρική σταθερά του κενού ίση με :  $\frac{1}{36*\pi}*10^{-9}$  F/m =  $8,854*10^{-12}$  F/m

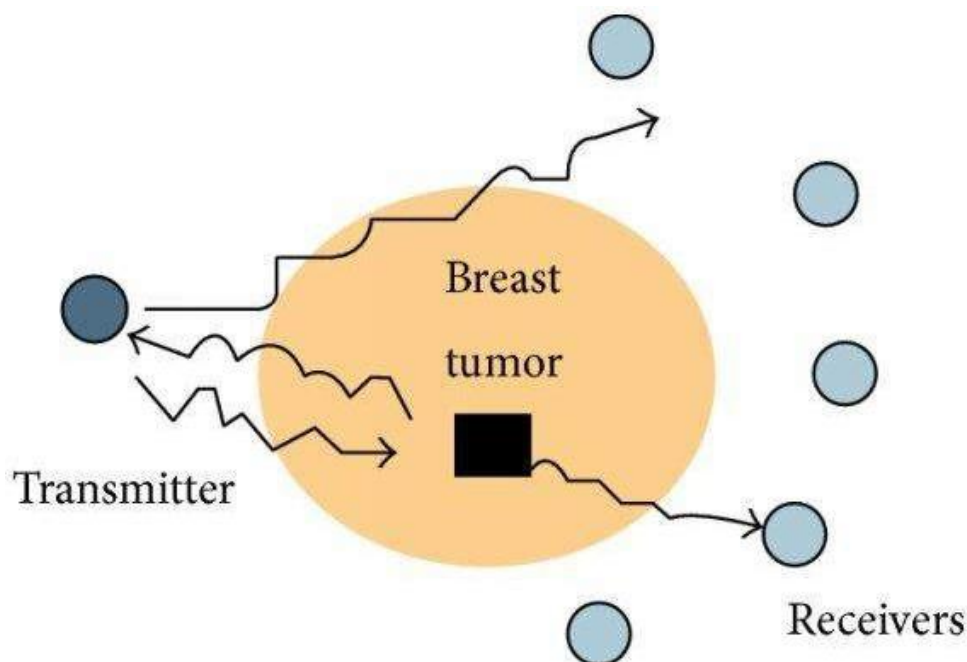
$\omega$ : γωνιακή συχνότητα (rad/s)

Όταν κατευθύνουμε σε ένα υλικό ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μικροκυματικής συχνότητας, μέρος αυτής της ενέργειας ανακλάται, ένα άλλο μέρος της εκπέμπεται μέσω της επιφάνειας του υλικού και ένα ποσοστό της τελευταίας, απορροφάται. Οι αναλογίες της ενέργειας, που εμπίπτουν σε αυτές τις 3 κατηγορίες έχουν οριστεί σε όρους διηλεκτρικών ιδιοτήτων. Κατά την πειραματική μέτρηση της διηλεκτρικής σταθεράς, ο πειραματικός εξοπλισμός πρακτικά εξετάζει αυτή την συμπεριφορά του εξεταζόμενου υλικού (ανάκλαση αρχικού σήματος και εκπεμπόμενο σήμα από το υλικό) για να μας αποδώσει την τιμή του  $\epsilon_r'$ .

Όταν μιλάμε για βιολογικούς ιστούς, η σύνθετη διηλεκτρική επιτρεπτότητα  $\epsilon^*$  είναι αυτή που περιγράφει την αλληλεπίδραση του, με ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο (Alessandra La Gioia, Emily Porter ,Ilja Merunka, Atif Shahzad ,Saqib Salahuddin , Marggie Jones & Martin O'Halloran, 2018).

Γιατί, όμως μας ενδιαφέρει τόσο πολύ η μελέτη των διηλεκτρικών ιδιοτήτων;

Η ηλεκτρομαγνητική απεικόνιση μικροκυματικής συχνότητας (Microwave Imaging), έχει σημειώσει αξιοσημείωτη πρόοδο προς την κλινική χρήση τις τελευταίες 2 δεκαετίες, καθώς οι διηλεκτρικές ιδιότητες των βιολογικών ιστών επιτρέπουν τη διαφοροποίηση των καλοηθών και κακοήθων κυττάρων στην απεικόνιση του καρκίνου του μαστού, την παρακολούθηση του όγκου της ουροδόχου κύστης στη θεραπεία της ενούρησης και της ακράτειας ούρων και την ανίχνευση εγκεφαλικού επεισοδίου στην ενδοκρανιακή απεικόνιση (Alessandra La Gioia, Emily Porter ,Ilja Merunka, Atif Shahzad ,Saqib Salahuddin , Marggie Jones & Martin O'Halloran, 2018).



Εικόνα 6: Μετάδοση σήματος ανίχνευσης καρκίνου του μαστού (Wang, Z., Lim, Y. T., Tang, Y., & Leach, M., 2014).

Η διηλεκτρική σταθερά επηρεάζει τον τρόπο διάδοσης των ηλεκτρικών πεδίων και αποτελεί θεμελιώδη παράμετρο στην ηλεκτρομαγνητική και την επιστήμη των υλικών. (Rahul Awati, 2022).

Ένας άλλος τρόπος υπολογισμού της διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r'$  είναι :  $\epsilon_r' = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$

Όπου,

$\epsilon$  : Η απόλυτη τιμή διηλεκτρικής επιτρεπτότητας ενός υλικού

$\epsilon_0$  : Η διηλεκτρική σταθερά του κενού

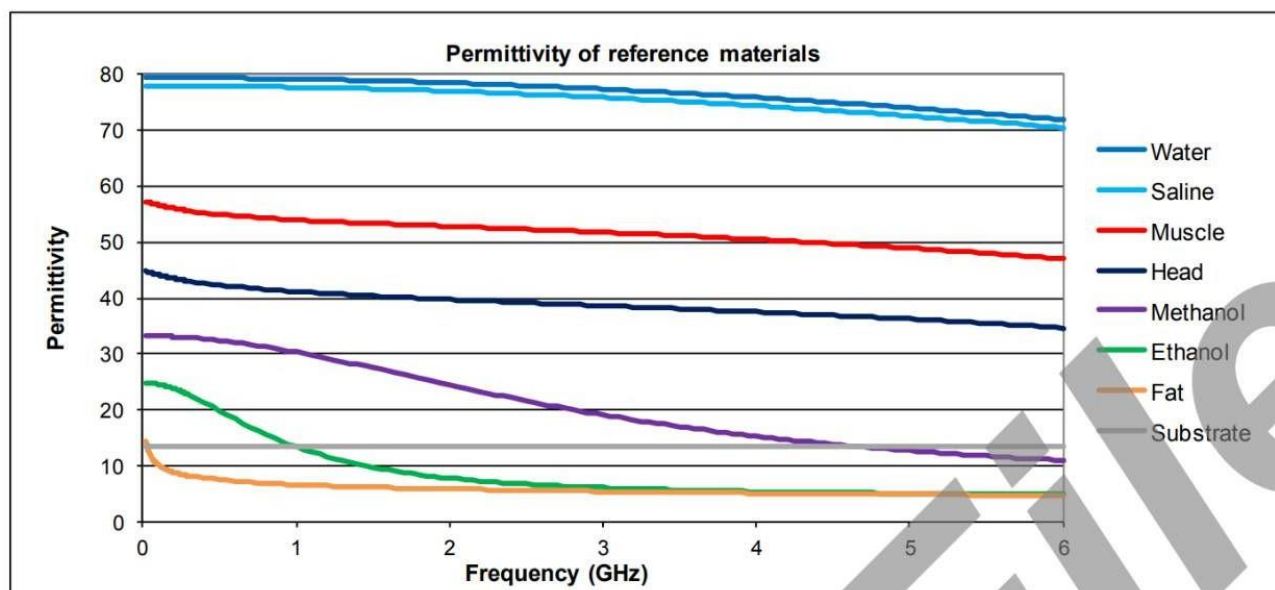
Το εύρος της διηλεκτρικής σταθεράς κυμαίνεται από 1 έως περίπου 60, για τυπικές μηχανολογικές εφαρμογές. (Steven W. Ellingson, 2018).

Μερικές τυπικές τιμές διηλεκτρικής σταθεράς υλικών:

Υλικό/Μέσο	Διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r'$
Κενό	1 (εξ ορισμού)
Αέρας	1,0006
Πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE, τεφλόν)	2,1
Χαρτί	3,85
Διαμάντι	5,5 – 10
Μεθανόλη	30
Νερό	80,1
Διοξείδιο του τιτανίου (TiO <sub>2</sub> )	86 – 173
Τιτανικό βάριο (BaTiO <sub>3</sub> )	1.200 – 10.000
CaCu <sub>3</sub> Ti <sub>4</sub> O <sub>12</sub> (CCTO)	>250.000



Πίνακας 2: Διηλεκτρική σταθερά υλικών για στατικά ηλεκτρικά πεδία (Pavan M. V. Raja & Andrew R. Barron, 2012).



Εικόνα 7: Διηλεκτρική σταθερά υλικών αναφοράς συναρτήσει της συχνότητας (Calibration laboratory of Schmid & Partner Engineering AG, 2014).

#### 2.1.4 Τεχνική & Όργανο Μέτρησης Διηλεκτρικής Σταθεράς

Ύστερα από μία σύντομη εξήγηση της διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r$ , βρισκόμαστε στο στάδιο όπου χρειαζόμαστε μία μέθοδο για να μετρήσουμε αριθμητικά αυτήν την τιμή ενός υλικού. Γενικά, υπάρχουν διάφορες τεχνικές μέτρησης των διηλεκτρικών ιδιοτήτων όπως η μέθοδος γραμμών μεταφοράς & κυματοδηγών (transmission line and waveguide), τετραπολική εμπέδηση (tetrapolar impedance) κλπ. Εμάς μας ενδιαφέρει, η τεχνική του ομοαξονικού καθετήρα ανοιχτού άκρου (open-ended coaxial probe).

##### Μέθοδος ομοαξονικού καθετήρα ανοιχτού άκρου

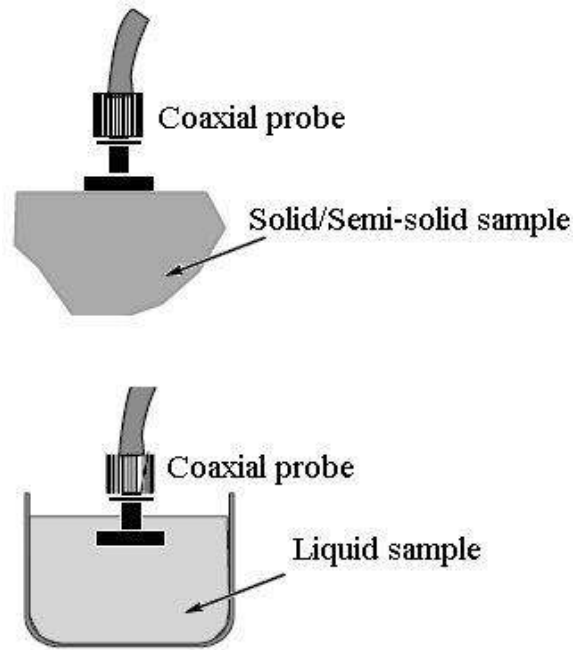
Ο ομοαξονικός καθετήρας ανοιχτού άκρου αποτελεί ένα αποκομμένο τμήμα της μεθόδου γραμμής μεταφοράς και χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του συντελεστή ανάκλασης του εξεταζόμενου υλικού. Το πλάτος και η φάση του ανακλώμενου σήματος μας δίνει πληροφορίες για τις διηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού.

Αποτελεί μία βολική, συχνή τεχνική και μαζί με το διανυσματικό αναλυτή δικτυωμάτων (VNA) μετράει το σύνθετο συντελεστή ανάκλασης. Για επίπεδες επιφάνειες, ο ανιχνευτής έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του δείγματος και για υγρά βυθίζεται πλήρως.

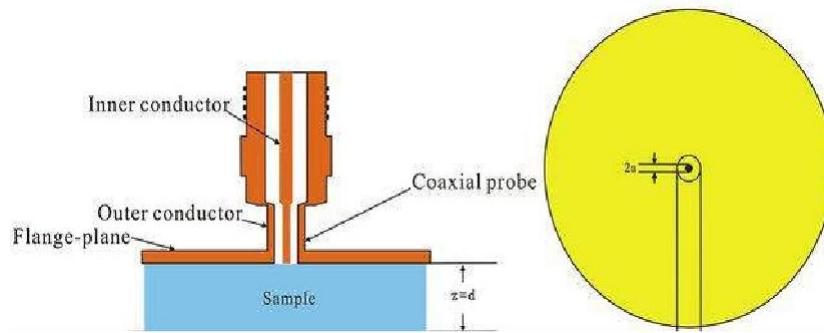
Όταν πραγματοποιούμε μετρήσεις, υπάρχουν 2 τύποι σφαλμάτων : α) Λόγω εξοπλισμού, β) Λόγω του εξεταζόμενου υλικού.

Τα σφάλματα εξοπλισμού αφορούν την επιλογή του εξοπλισμού μέτρησης, τις αβεβαιότητες μέτρησης και τη βαθμονόμηση.

Τα σφάλματα εξεταζόμενου υλικού οφείλονται σε παράγοντες όπως : η θερμοκρασία, επαφή καθετήρα-δείγματος, διαδικασία χειρισμού δείγματος, ιδιότητες δείγματος και ετερογένεια.



Εικόνα 8: Ομοαξονικός ανιχνευτής σε επαφή με εξεταζόμενα υλικά (εικόνα από Muhammad Taha Jilani, Muhammad Zaka ur Rehman, Abid Muhammad Khan, Muhammad Talha Khan & Syed Muzamil Ali, 2012).

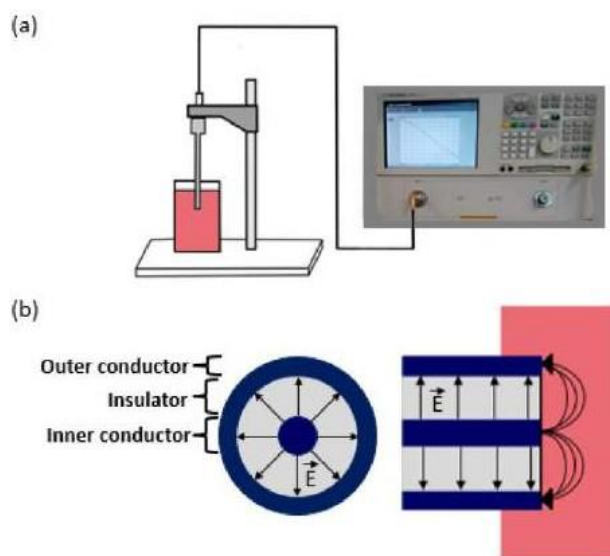


Εικόνα 9: Σχηματική απεικόνιση ομοαξονικού καθετήρα ανοικτού άκρου (εικόνα από Sixin Liu, Junjun Wu, Lili Zhang & Hang Dong, 2011).

<i>Μέθοδος ομοαξονικού καθετήρα</i>	
<i>Πλεονεκτήματα</i>	<i>Μειονεκτήματα</i>
Μετρήσεις σε ευρεία ζώνη συχνότητας (0,5 – 110 GHz)	Τα κενά αέρα δημιουργούν σφάλματα στις μετρήσεις
Απλή, βολική και μη καταστροφική Η καλύτερη για ημι-στερεά ή υγρά υλικά	
Απαιτείται απλή προετοιμασία δείγματος	Είναι αναγκαίες συνεχείς βαθμονομήσεις
Κατάλληλη για ισοτροπικά και ομοιογενή δείγματα	
Υψηλή ακρίβεια για υλικά με υψηλές απώλειες	

Πίνακας 3: Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα μεθόδου ομοαξονικού καθετήρα

Τα χαρακτηριστικά ηλεκτρικών δικτύων υψηλής συχνότητας μπορούν να μετρηθούν και να αναλυθούν με τη χρήση ενός ακριβούς ηλεκτρονικού εργαλείου, του διανυσματικού αναλυτή δικτύου (VNA). Όταν το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο συναντά αναντιστοιχία εμπέδησης μεταξύ του καθετήρα και του υλικού προς εξέταση, προκύπτει ανάκλαση του σήματος κατά μήκος της ομοαξονικής γραμμής, όπου διαδίδεται το πεδίο. Μετά τη μέτρηση, τα ανακλώμενα σήματα σε διάφορες συχνότητες μετατρέπονται σε τιμές σύνθετης διηλεκτρικής επιτρεπτότητας  $\epsilon^*$ . Πριν τη λήψη μιας μέτρησης, είναι ζωτικής σημασίας να παραχωρήσουμε στο καλώδιο που συνδέει τον ανιχνευτή με τον αναλυτή δικτύου, αρκετό χρόνο για να σταθεροποιηθεί η σύνδεση τους. Η δημιουργία, κατασκευή και συντήρηση συσκευών ραδιοσυχνότητας και μικροκυμάτων είναι ένα τομέας χρήσης τους. Πρακτικά, το VNA μετράει το πλάτος και τη φάση σημάτων σε διάφορες συχνότητες, για να το μετατρέψει σε τιμές διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r'$  και όχι μόνο.



Εικόνα 10: (α) Μετρητικό σύστημα διηλεκτρικής σταθεράς. Στη θύρα του VNA (δεξιά) συνδέεται ένα καλώδιο, αυτό με τη σειρά του στον ομοαξονικό καθετήρα και ο τελευταίος μετράει το υγρό δείγμα. (β) Άνοψη και πλάγια τομή του αισθητήρα, με τον προσανατολισμό του ηλεκτρικού πεδίου (Εικόνα από Alessandra La Gioia, Emily Porter ,Ilja Merunka, Atif Shahzad ,Saqib Salahuddin , Marggie Jones & Martin O'Halloran, 2018).

Για τη διαδικασία της λήψης δεδομένων, απαιτείται πρώτα να πραγματοποιήσουμε βαθμονόμηση στο μετρητικό μας σύστημα.

#### Βαθμονόμηση μετρητικού συστήματος

Μια προσέγγιση βαθμονόμησης 3 πρότυπων φορτίων χρησιμοποιείται συνήθως για τη διόρθωση σφαλμάτων μια θύρας. Επιλέγουμε 3 υλικά/φορτία με γνωστές διηλεκτρικές ιδιότητες, τα οποία είναι εύκολα στη χρήση, φθηνά και διαθέσιμα στην αγορά. Για τη μέθοδο του ομοαξονικού καθετήρα, τα 3 πιο συνήθη πρότυπα είναι : ανοιχτού κυκλώματος (open circuit), βραχυκυκλώματος (short circuit) και φορτίο ευρείας ζώνης (broadband/liquid/load circuit). Η βαθμονόμηση αποσκοπεί στην καθιέρωση μιας σχέσης μεταξύ του μετρούμενου και του αναμενόμενου συντελεστή σύνθετης ανάκλασης και καταληκτικά μας επιτρέπει τη διόρθωση όλων των δεδομένων μέτρησης. Στη δικιά μας περίπτωση, για το ανοιχτό κύκλωμα κάνουμε

χρήση του ατμοσφαιρικού αέρα, για του βραχυκυκλώματος λωρίδες χαλκού και για το φορτίο ευρείας ζώνης απιονισμένο νερό.

Βήματα βαθμονόμησης	Παράγοντας σφάλματος	Ενέργεια για διόρθωση
Ρύθμιση εξοπλισμού	Αλλαγή στις περιβαλλοντικές συνθήκες, μόλυνση/ρύπανση καθετήρα, ατελής σύνδεση & κίνηση καλωδίου σύνδεση VNA-ανιχνευτή	Έλεγχος περιβαλλοντικών παραμέτρων, καθαρισμός και επιθεώρηση καθετήρα, έλεγχος συνδέσεων & διόρθωση καλωδίου στερέωσης (εάν δεν είναι σταθερής φάσης)
Open Circuit	Σωματίδια στο άκρο του καθετήρα	Καθαρισμός καθετήρα & έλεγχος διαγράμματος Smith για την εξασφάλιση μέτρησης εμπέδησης ανοικτού κυκλώματος
Short Circuit	Ανεπαρκής επαφή καθετήρα – υλικού βαθμονόμησης	Καθαρισμός μπλοκ στήριξης υλικού βαθμονόμησης και καθετήρα, επανατοποθέτηση μπλοκ στήριξης στον καθετήρα & έλεγχος διαγράμματος Smith για την εξασφάλιση μέτρησης εμπέδησης βραχυκυκλώματος
Load Circuit	Ακρίβεια του υγρού μοντέλου, θερμοκρασία υγρού φορτίου, φυσαλίδες αέρα, μόλυνση υγρού & θέση καθετήρα στο υγρό	Έχουμε την καλύτερη ακρίβεια με το μοντέλο απιονισμένου νερού, παρακολούθηση ή έλεγχος θερμοκρασίας, βυθίζουμε τον καθετήρα ξανά στο υγρό, περιορίζουμε την έκθεση τον αέρα & τοποθετούμε τον αισθητήρα μακριά από τις πλευρές του ποτηριού

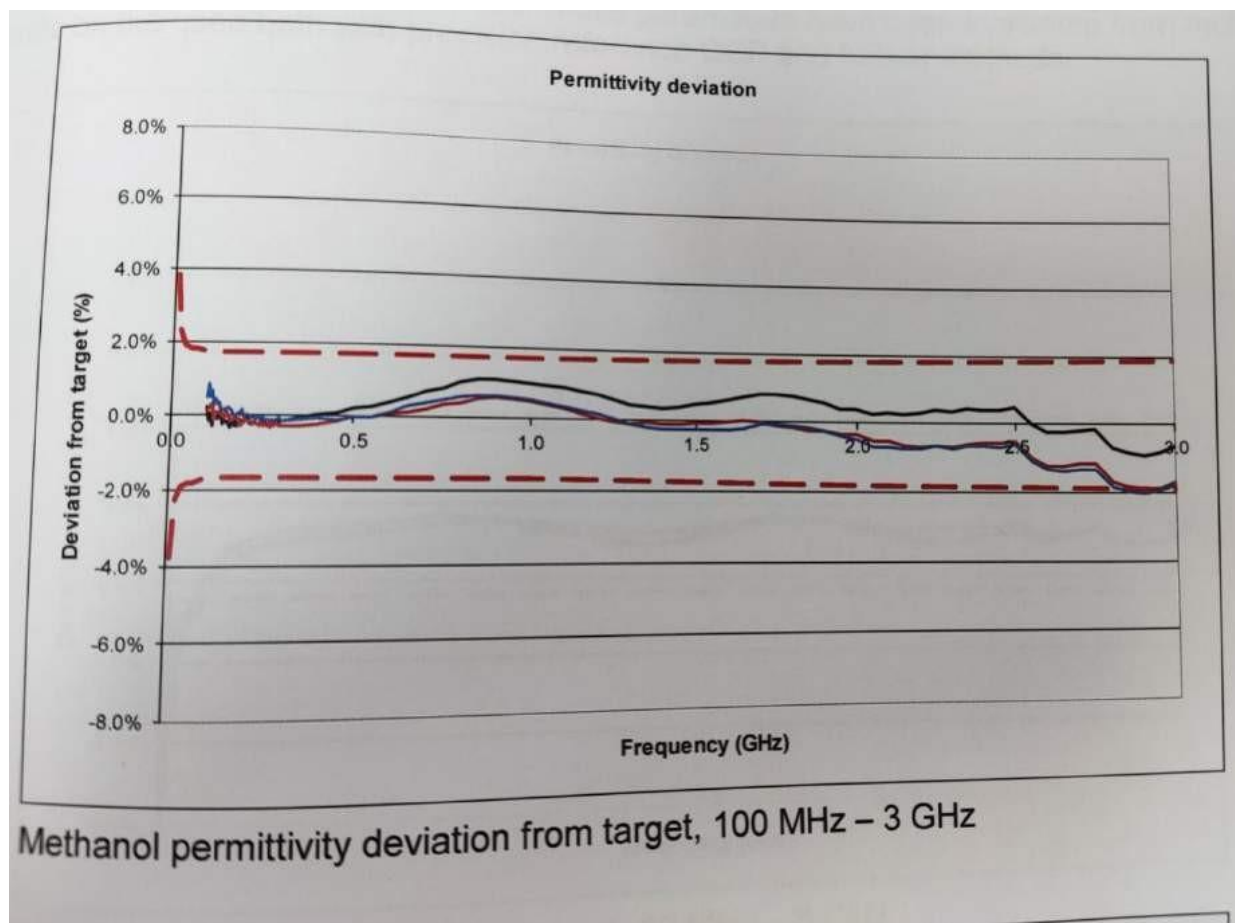
Πίνακας 4: Τα συνήθη σφάλματα ή παράγοντες σύγχυσης που συμβαίνουν σε κάθε βήμα της διαδικασία βαθμονόμησης, καθώς και πιθανές μέθοδοι διόρθωσης ή αντιστάθμισης (Alessandra La Gioia, Emily Porter ,Ilja Merunka, Atif Shahzad ,Saqib Salahuddin , Marggie Jones & Martin O’Halloran, 2018).

Μετά το πέρας της βαθμονόμησης, περνάμε στη διαδικασία της επαλήθευσης όπου μετράμε τις διηλεκτρικές ιδιότητες ενός γνωστού υγρού αναφοράς. Μέσω αυτής της διαδικασίας, είναι δυνατή η αξιολόγηση της ακρίβειας της βαθμονόμησης και η παρακολούθηση των συστηματικών σφαλμάτων, όπως η μετατόπιση του VNA και ο θόρυβος που προκαλείται από την κίνηση των καλωδίων. Επομένως, συνιστάται η επικύρωση να γίνεται το συντομότερο δυνατό μετά τη βαθμονόμηση και μετά τη λήψη μιας σειράς δεδομένων διηλεκτρικού υλικού (Alessandra La Gioia, Emily

Porter ,Ija Merunka, Atif Shahzad ,Saqib Salahuddin , Marggie Jones & Martin O'Halloran, 2018).

Μερικά υγρά επαλήθευσης είναι οι αλκοόλες (μεθανόλη, αιθανόλη, βουτανόλη κλπ.), τα αλατούχα διαλύματα, το μεθαναμίδιο, το απιονισμένο νερό, το διμεθυλοσουλφοξείδιο και η ακετόνη.

Τέλος, στις διηλεκτρικές μετρήσεις υπάρχουν αβεβαιότητες. Μέσα στο πιστοποιητικό του σετ διηλεκτρικής αξιολόγησης, έχουμε εκτίμηση των μετρήσεων και αναπαράσταση της απόκλισης της διηλεκτρικής σταθεράς, με βάση δεδομένα αναφοράς σε συγκεκριμένη θερμοκρασία μέτρησης.



Εικόνα 11: Απόκλιση διηλεκτρικής σταθεράς υγρού επαλήθευσης (μεθανόλη), για εύρος συχνότητας 100 MHz – 3.000 MHz. Μέτρηση μεθανόλης σε θερμοκρασία ( $22 \pm 2$ )°C. Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή δείχνει την αβεβαιότητα ως το ποσοστό της απόκλισης από την ονομαστική τιμή του υλικού αναφοράς. Αυτή η τιμή έχει υπολογιστεί από το εθνικό φυσικό εργαστήριο (NPL), το οποίο είναι το εθνικό ινστιτούτο μετρολογίας του Ηνωμένου Βασιλείου (NMI)

## 2.2 Ηλεκτρομαγνητισμός

Ο ηλεκτρομαγνητισμός είναι η φυσική αλληλεπίδραση μεταξύ των ηλεκτρικών φορτίων, των μαγνητικών ροπών και του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου (Christopher S. Baird, 2019).

Η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση είναι μία από τις τέσσερις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις του σύμπαντος. Η αλληλεπίδραση αυτή περιλαμβάνει όλα τα

φυσικά φαινόμενα που σχετίζονται με τον ηλεκτρισμό, τον μαγνητισμό, τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, το φως και τα άτομα. Ως εκ τούτου, ο ηλεκτρομαγνητισμός αποτελεί τη θεμελιώδη βάση για ένα ευρύ φάσμα επιστημών, συμπεριλαμβανομένης της φυσικής στερεάς κατάστασης, της οπτικής, της χημείας και της μοριακής βιολογίας. Όλα τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα προκύπτουν από την αλληλεπίδραση ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων, σωματιδίων με εγγενή μαγνητική ροπή και του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. (Christopher S. Baird, 2019).

### 2.2.1 Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα αναφέρεται στο εύρος της συχνότητας ή του μήκους κύματος στο οποίο εκτείνεται η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (The Editors of Encyclopedia Britannica, 2022).

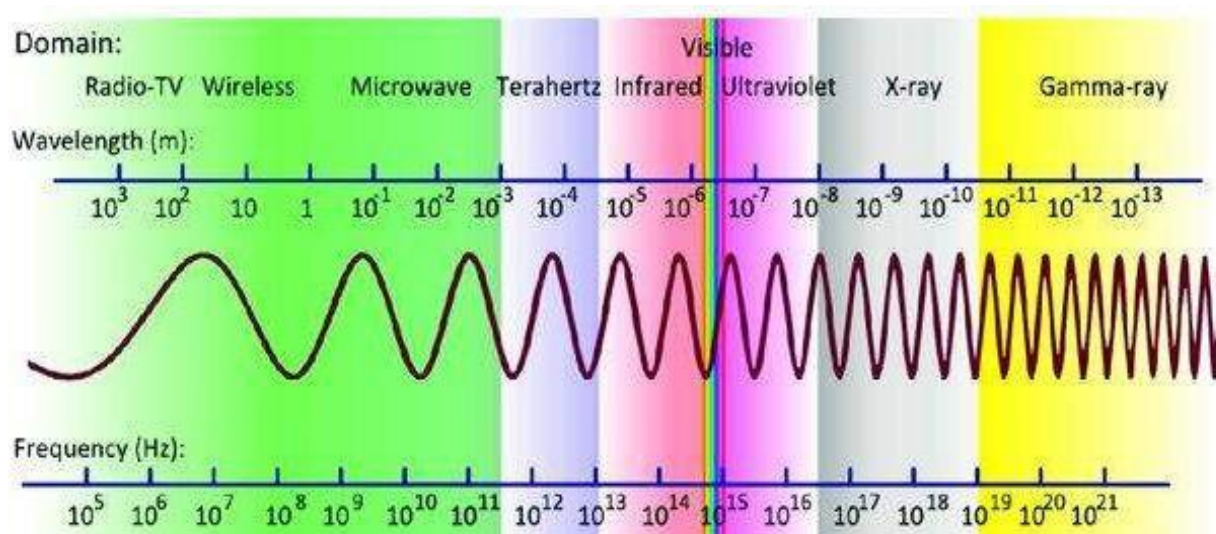
Ο όρος ηλεκτρομαγνητικό φάσμα αναφέρεται στις διάφορες μορφές ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων που υπάρχουν στο συνεχές φάσμα των συχνοτήτων (Steven W. Ellingson, 2018).

Το μήκος ενός κύματος  $\lambda$  συνδέεται με τη συχνότητα  $f$  την οποία μεταδίδεται και την ταχύτητα του φωτός  $c$ .

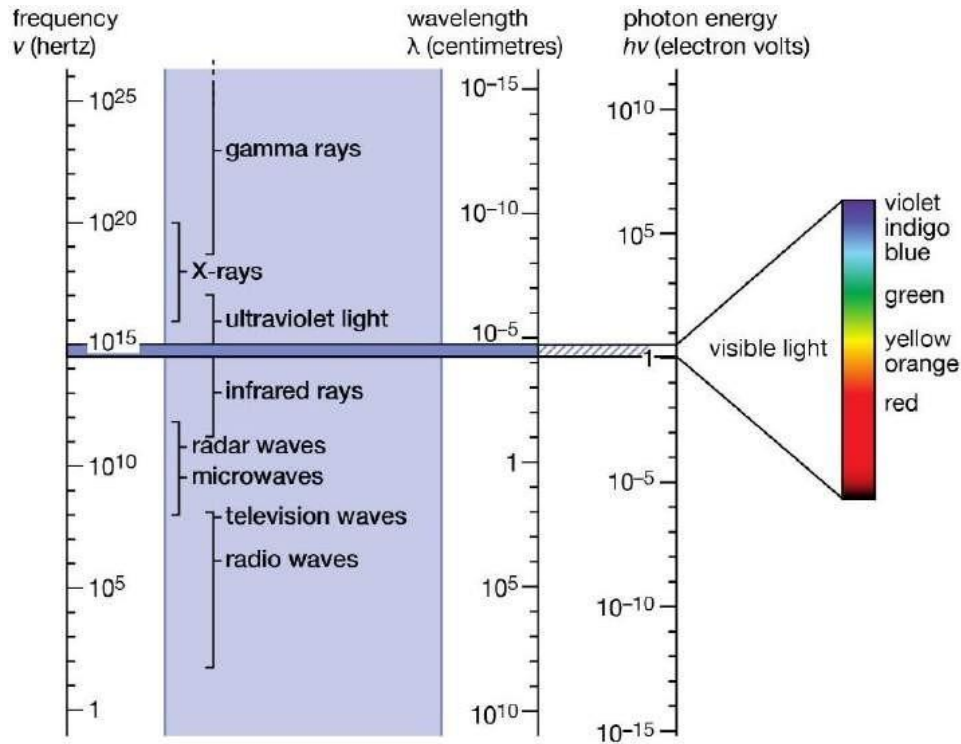
$$\lambda = \frac{c}{f}, \text{ όπου :}$$

$$c \cong 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Εμείς ασχολούμαστε με μικροκυματικές συχνότητες δηλαδή συχνότητες σε τάξη μεγέθους 0,3-300 GHz.



Εικόνα 12: Το φάσμα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (Mihai Danciu, Teodora Alexa-Stratulat, Cipriana Stefanescu et al., 2019)



© Encyclopædia Britannica, Inc.

Εικόνα 13: Διαχωρισμός ηλεκτρομαγνητικού φάσματος αναλόγως της συχνότητας (The Editors of Encyclopædia Britannica, 2022)

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα μπορεί να χωριστεί σε 2 μεγάλες κατηγορίες :

- Ιονίζουσα ακτινοβολία
- Μη ιονίζουσα ακτινοβολία

## 2.2.2 Ιονίζουσα Και Μη Ακτινοβολία

### Ιονίζουσα Ακτινοβολία

Η ιονίζουσα ακτινοβολία έχει την ικανότητα να αφαιρεί τα ηλεκτρόνια από τα άτομα (ιονισμός) λόγω της υψηλής ενέργειας που περιέχει. Για συχνότητα περίπου άνω της 2.500 THz (υπεριώδης ακτινοβολία), έχουμε ιονίζουσα ακτινοβολία. Σε αυτή την κατηγορία, ανήκουν οι ακτίνες X,  $\gamma$ , σωματίδια άλφα και βήτα, νετρόνια κλπ.

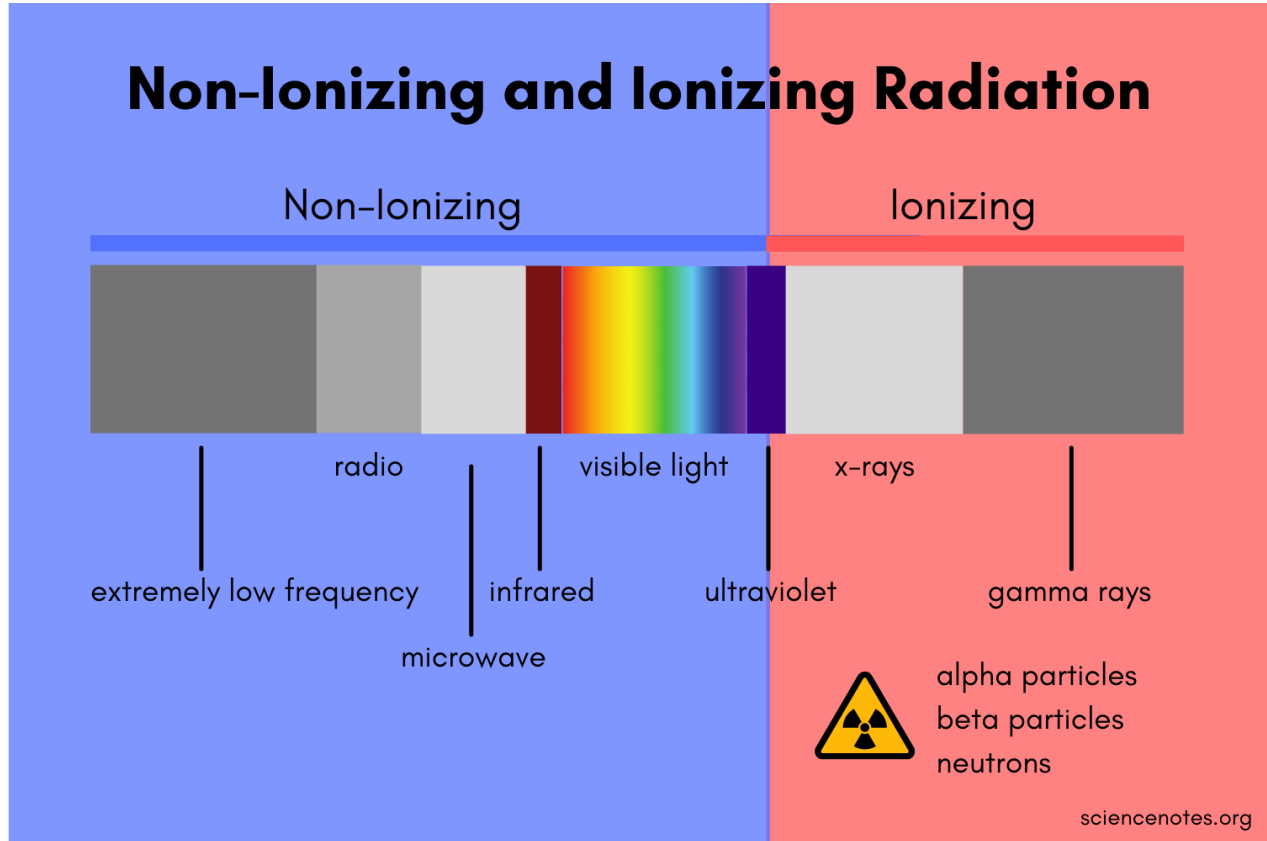
Αυτού του είδους η ακτινοβολία, έχει αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία καθώς μπορεί να βλάψει ή/και να σκοτώσει κύτταρα ακόμη και να αλλάξει το DNA, λόγω της αρκετά υψηλής ενέργειας. Οι ακτινοβολίες άλφα, γάμμα και νετρονίων δύναται να προκαλέσουν ραδιενέργεια σε προηγούμενως μη ραδιενεργά υλικά.

### Μη Ιονίζουσα Ακτινοβολία

Αντίθετα, η μη ιονίζουσα ακτινοβολία δεν μπορεί να ιονίσει άτομα ή μόρια, λόγω της ανεπάρκειας ενέργειας. Παρ' όλα αυτά, καταφέρνει να διεγείρει τα ηλεκτρόνια σε υψηλότερες ενεργειακές στάθμες. Το ορατό φως, η υπέρυθη ακτινοβολία, τα μικροκύματα καθώς και άλλες κατηγορίες αποτελούν μέρος αυτής της ακτινοβολίας.

Χαμηλή έκθεση σε μη ιονίζουσα ακτινοβολία προκαλεί κυρίως θέρμανση, δίχως να αποτελεί απειλή και μόνο σε υπερβολικά επίπεδα μπορεί να οδηγήσει σε βλάβη των ιστών. Σε ακραίες περιπτώσεις, η ακτινοβολία χαμηλής συχνότητας μπορεί να

επηρεάζει τις μυϊκές και νευρικές λειτουργίες. Ενώ το υπέρυθρο, το ορατό και το υπεριώδες φως δεν ιονίζουν τα άτομα αλλά είναι ικανά να προκαλέσουν χημικές αντιδράσεις λόγω της ενέργειας που διαθέτουν. Έντονη έκθεση στο φως μπορεί να οδηγήσει σε φωτογήρανση, υπερμελάγχρωση του δέρματος και καταρράκτη (Anne Helmenstine, 2023).



Εικόνα 14: Ιονίζουσα και μη ακτινοβολία στο εύρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Anne Helmenstine, 2023)



## 2.3 Στατιστικές Έννοιες

Προκειμένου να αντληθούν πολύτιμες πληροφορίες από τις πειραματικές μετρήσεις, κάνουμε χρήση στατιστικών μεγεθών. Αυτά μας επιτρέπουν να εμβαθύνουμε στα δεδομένα πέρα από τις μεμονωμένες μετρήσεις και να παρακολουθήσουμε πως σχετίζονται διάφοροι παράγοντες μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, μας ενδιαφέρει η μέση τιμή  $\mu$ , η τυπική απόκλιση  $\sigma$  και ο συντελεστής διακύμανσης CV. Τέλος, θα αναφερθούμε κανονική κατανομή ή γκαουσιανή κατανομή.

### 2.3.1 Μέση Τιμή $\mu$

Συνήθως, όταν έχουμε ένα πλήθος δεδομένων δεν μας ενδιαφέρει η κάθε τιμή ξεχωριστά, αλλά περισσότερο μία τιμή που αντιπροσωπεύει το σύνολο. Αυτή η μία τιμή επιδιώκει να χαρακτηριστεί ως ο εκπρόσωπος των στοιχείων και ονομάζεται μέση τιμή.

Η μέση τιμή ενός πληθυσμού συμβολίζεται με  $\mu$  και η μέση τιμή ενός δείγματος με  $\bar{x}$ .

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^v x_i$$

Στον υπολογισμό της μέσης τιμής  $\mu$ , συμμετέχουν όλα τα δεδομένα, οπότε αυτή είναι ευαίσθητη σε ακραίες τιμές (outliers). Το σύνολο δεδομένων [0,50,100] μας αποδίδει μέση τιμή 50 αλλά και για τα δεδομένα [49,50,51] έχουμε το ίδιο αποτέλεσμα. Η μέση τιμή από μόνη της, δεν μας πληροφορεί αρκετά για ένα πληθυσμό αριθμών και για αυτό είναι αναγκαίο να συνοδεύεται από έννοιες όπως η τυπική απόκλιση  $\sigma$  & ο συντελεστής διακύμανσης CV. Αυτά τα μεγέθη είναι πολύ σπουδαία και τα απαιτούμε για να προσδώσουμε ισχύ στα πειραματικά μας δεδομένα.

### 2.3.2 Τυπική Απόκλιση $\sigma$

Η τυπική απόκλιση (standard deviation)  $\sigma$  μας ενημερώνει πόσο κατανεμημένοι είναι οι αριθμοί γύρω από τη μέση τιμή. Άρα, μικρή τυπική απόκλιση δηλώνει ότι το πλήθος των δεδομένων βρίσκονται αριθμητικά κοντά στο μέσο όρο και έχει βαρύτητα όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τη μέση τιμή.

Η τυπική απόκλιση του πληθυσμού συμβολίζεται με  $\sigma$  και του δείγματος με  $s$ .

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^v (x_i - \bar{x})^2}$$

Αμα θελήσουμε να συγκρίνουμε τις μεταβλητότες για δύο ή περισσότερες ομάδες δεδομένων με άνισες μέσες τιμές, οι τυπικές αποκλίσεις από μόνες τους δεν είναι αρκετές και λογικά θα καταλήξουμε σε εσφαλμένο συμπέρασμα. Κατ' ακολουθίαν, θέλουμε ένα μέτρο για να συγκρίνει την τυπική απόκλιση με τη μέση τιμή και αυτό είναι ο συντελεστής μεταβλητότητας (coefficient of variation).

### 2.3.3 Συντελεστής Μεταβλητότητας CV

Ο συντελεστής μεταβλητότητας CV εκφράζει τη σχετική μεταβλητότητα ενός συνόλου δεδομένων, ανεξάρτητα από την κλίμακα τους.

$$CV = \frac{s}{|\bar{x}|} * 100 \%$$

Έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί : α) ως μέτρο σύγκρισης μεταβλητότητας 2 ή περισσότερων δειγμάτων που εμφανίζουν διαφορετικές μέσες τιμές ή μονάδες

μέτρησης,  $\beta$ ) ως μέτρο ομοιογένειας ενός δείγματος (εφόσον το δείγμα παρουσιάζει  $CV < 10\%$ , τότε το δείγμα θεωρείται ομοιογενές) (Γιώργος Παπαδόπουλος, 2015).

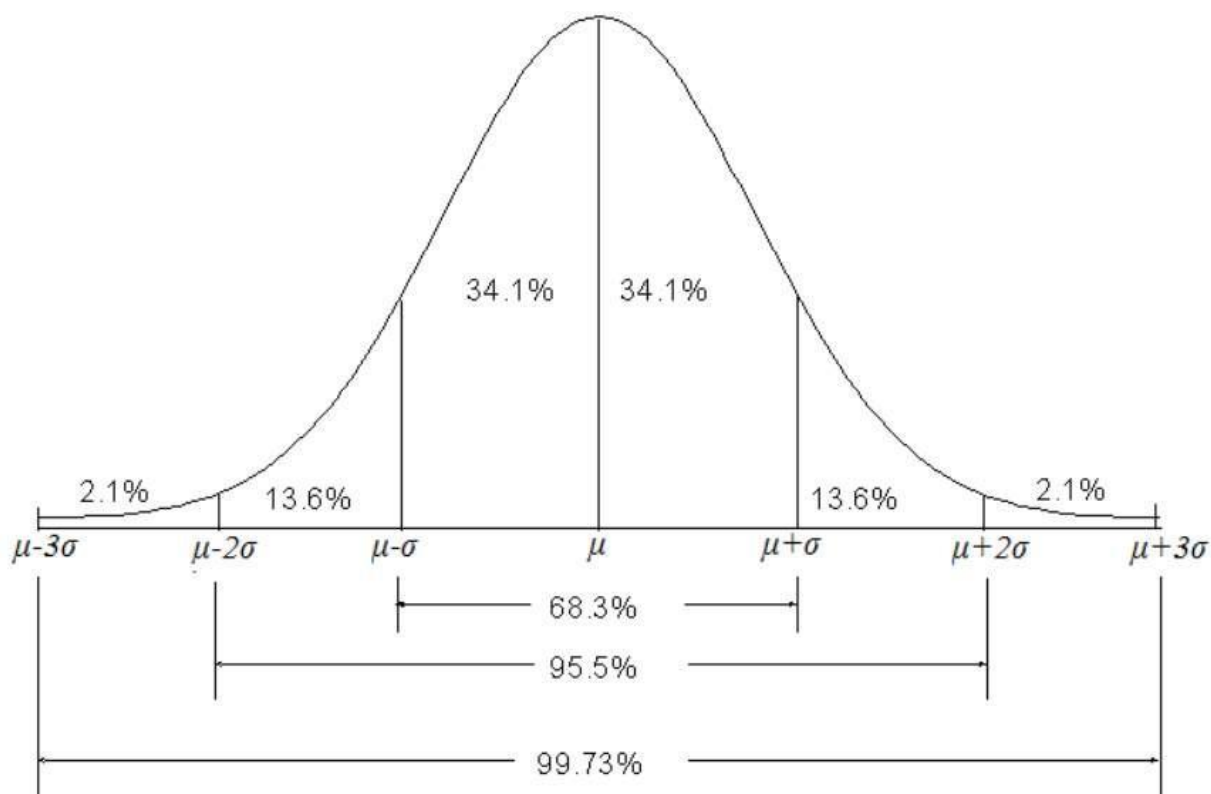
### 2.3.4 Κανονική Κατανομή (Γκαουσιανή Κατανομή)

Η κανονική κατανομή αποτελεί μια συνεχή κατανομή πιθανοτήτων που έχει σχήμα καμπάνας, είναι συμμετρική και αντιπροσωπεύεται από τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση. Ένα βασικό στοιχείο της είναι ότι μπορεί να περιγράψει σε επαρκή βαθμό πολλές τυχαίες μεταβλητές.

Η συνάρτηση πυκνότητας της Γκαουσιανής κατανομής έχει τύπο :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad -\infty < x < +\infty$$

όπου, τυπική απόκλιση  $\sigma > 0$  & μέση τιμή  $-\infty < \mu < +\infty$ .



Εικόνα 15: Κατανομή Gauss. Αν τα δεδομένα μας περιγράφονται από αυτή την κατανομή, τότε έχουμε πιθανότητα 68,2%, η τιμή να βρίσκεται εντός του διαστήματος  $\mu \pm \sigma$ . Αντίστοιχα, το διάστημα  $\mu \pm 2\sigma$  περιέχει το 95,5 % των δεδομένων μας κλπ. (εικόνα από Γιώργος Παπαδόπουλος, 2015).

### 2.4 Βιοιατρική Και Σύνθετα Υλικά

Στο υπό-κεφάλαιο που έπεται αναφερόμαστε σε επιστημονικά άρθρα που ασχολούνται με τη βιοιατρική και τα σύνθετα υλικά.

Για την αντιμετώπιση και εντοπισμό ανθρώπινων ασθενειών, πραγματοποιούμε πειράματα σε ειδικά σχεδιασμένα αντικείμενα, τα οποία στον τομέα της βιοιατρικής ονομάζονται ως «ανθρώπινα φαντάσματα» (human phantoms). Αυτά

χρησιμοποιούνται ως "υποκατάστατο" του ανθρώπινου ιστού και μπορούν να σαρωθούν για την αξιολόγηση, την ανάλυση και τη ρύθμιση της απόδοσης μιας συσκευής απεικόνισης. Η μέθοδος αυτή μας παρέχει συνεπή αποτελέσματα και μας διασφαλίζει ότι οι μέθοδοι απεικόνισης του ανθρώπινου σώματος λειτουργούν σωστά και παρέχουν αξιόπιστες και ποσοτικές/μετρήσιμες πληροφορίες. (Monica Jaszczak, 2023).

Τελικός μας στόχος ως εφαρμογή είναι να αναπτύξουμε κατάλληλο μαθηματικό μοντέλο και πρωτόκολλο, ώστε να κατασκευάσουμε και να μετρήσουμε δοκίμιο, που έχει την ίδια τιμή διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r$  με τη μέση τιμή του ανθρώπινου εγκεφάλου (average brain permittivity), σε μικροκυματική συχνότητα 1 GHz.

Μία ομάδα επιστημόνων διερεύνησε τις διηλεκτρικές ιδιότητες ενός phantom, αποτελούμενο από βασικά υλικά όπως ζελατίνη και νερό για να προσομοιώσει τον ανθρώπινο εγκέφαλο. Η μελέτη επικεντρώνεται στη διηλεκτρική μεταβολή λόγω της αναλογίας ζελατίνης και νερού σε μετρούμενες συχνότητες 1-6 GHz. Η μέτρηση της τιμής του  $\epsilon_r$ , στην παρούσα πειραματική μελέτη λαμβάνεται με τη χρήση ειδικού ομοαξονικού αισθητήρα σε συνδυασμό με ένα διανυσματικό αναλυτή δικτύου (VNA). Τελικά, αποδείχθηκε ότι τα μείγματα ζελατίνης-νερού μιμούνται επαρκώς διάφορους ανθρώπινους εγκεφαλικούς ιστούς (M. S. M. Said, N. Seman, M. K. A. Rahim and T. A. Rahman, 2014).

TABLE I  
GELATIN-BASED SAMPLES IN DIFFERENT RATIO OF GELATIN AND WATER

Sample No.	Gelatin (g)	Water (g)
Sample 1	10	50
Sample 2	10	40
Sample 3	10	30
Sample 4	10	20
Sample 5	10	15

Εικόνα 16: Ποσότητες ζελατίνης και νερού για τα 5 δείγματα (M. S. M. Said, N. Seman, M. K. A. Rahim and T. A. Rahman, 2014).

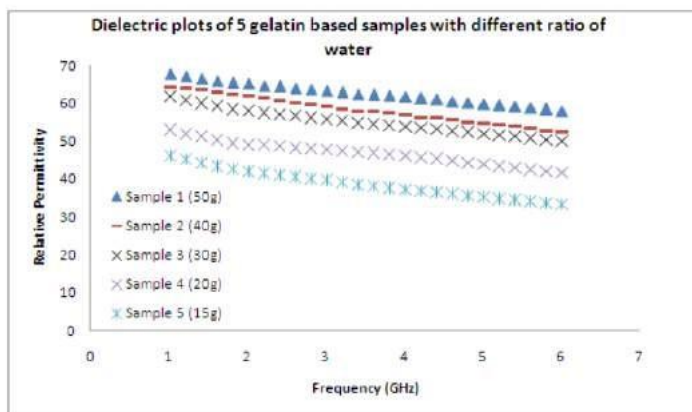


Fig. 1. Relative permittivity of five gelatin-based samples with different ratio of water.

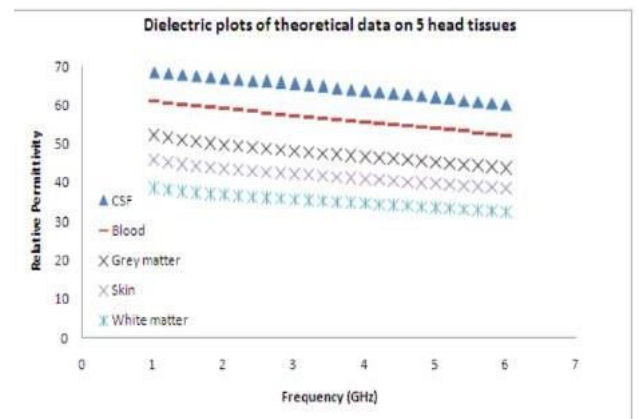
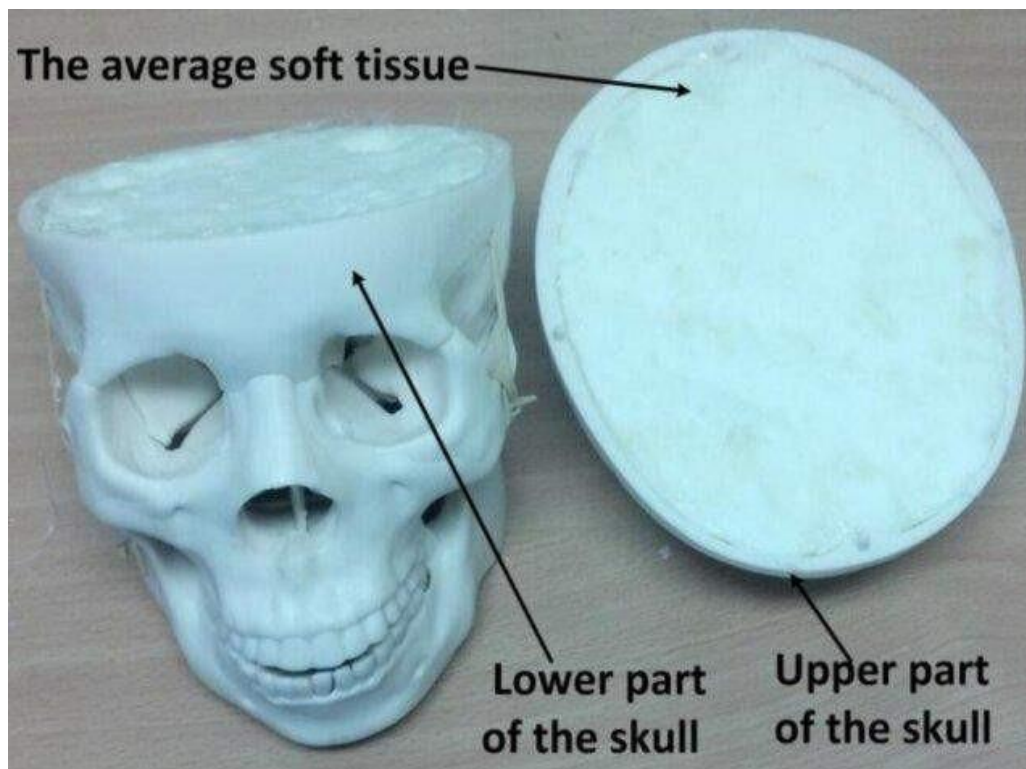


Fig. 4. Relative permittivity of theoretical data on 5 selected tissues.

Εικόνα 17: Θεωρητική τιμή διηλεκτρικής σταθεράς 5 ιστών κεφαλιού και η διηλεκτρική σταθερά των 5 δειγμάτων ζελατίνης - νερού (M. S. M. Said, N. Seman, M. K. A. Rahim and T. A. Rahman, 2014).

Μία άλλη ομάδα επιστημόνων, δημιούργησε ένα «φάντασμα» για να εξετάσει μικροκυματικά συστήματα και τεχνικές που έχουν ως σκοπό να απεικονίζουν το ανθρώπινο κεφάλι και να ανιχνεύουν εγκεφαλικά επεισόδια. Μέσα στο άρθρο, κάνουν χρήση πρότυπου ανθρωπόμορφου κεφαλιού τύπου EN50361 ως οδηγό, το οποίο θεωρείται ευρέως αποδεκτό. Αναφέρεται ότι οι ιδιότητες της διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r$  του μέσου ανθρώπινου εγκεφάλου ισούται με 42 και της αγωγιμότητας  $\sigma$  ίση με 0,99 S/m (συχνότητα 1 GHz). (Beadar'a Mohammed, Amin Abbosh, Bassem Henin & Philip Sharpe, 2012).



Εικόνα 18: Πρότυπο ανθρωπόμορφο κεφάλι (Beadar'a Mohammed, Amin Abbosh, Bassem Henin & Philip Sharpe, 2012).

Η συγκεκριμένη τιμή του  $\epsilon_r$  θα μας φανεί χρήσιμη, όταν θα απαιτήσουμε αργότερα από το καινούργιο πρωτόκολλο ένα δοκίμιο με αυτό το μέγεθος.

Τέλος, μία ομάδα ανθρώπων στη Μαλαισία ασχολήθηκε με την παραγωγή και μέτρηση φάντομ γυναικείου στήθους, με σύστημα απεικόνισης σε μικροκυματικές συχνότητες, με σκοπό τον εντοπισμό όγκου (καρκίνος του μαστού). Αρχικά, δημιουργούν την ανατομία ενός πραγματικού γυναικείου στήθους που αποτελείται από το δέρμα, το λίπος και τους αδένες, οι οποίοι διακατέχουν ρεαλιστικές τιμές διηλεκτρικών ιδιοτήτων. Μετά, εισάγουν με καλαμάκια τον όγκο σε θέσεις που επιθυμούν. Οι ιστοί απαρτίζονται από απλά και φθηνά υλικά όπως απιονισμένο νερό, αγάρ-αγάρ, καρθαμέλαιο κλπ. Ύστερα, λαμβάνεται σερ μετρήσεων για τα ετερογενή φάντομ μαστού και συγκρίνονται με τις θεωρητικές τιμές, με στόχο τη συμφωνία τους. Καταληκτικά, προκύπτει μικρή απόκλιση μεταξύ των θεωρητικών και πραγματικών δεδομένων. Επομένως, το φάντομ των ερευνητών έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο για έλεγχο συσκευών απεικόνισης, που σκοπεύουν να μεταφερθούν σε πραγματικές κλινικές δοκιμές.



(a)



(b)



(c)

Εικόνα 19: Παραγόμενο φάντομ γυναικείου στήθους. Το κίτρινο συνιστά το λίπος, το κόκκινο τους αδένες, το ανοιχτό πράσινο το εξωτερικό δέρμα και με μπλε έχουμε τον όγκο. (a) Εσωτερική όψη υγιούς στήθους. (b) Εξωτερική όψη εικόνας (a). (c) Γυναικείο στήθος με κακοήθεις μάζες κυττάρων.

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Εργαστηριακός Εξοπλισμός

### 3.1 Εισαγωγή

Ο σπουδαστής ύστερα από βιβλιογραφική μελέτη πάνω σε βασικές έννοιες στα σύνθετα υλικά και τις διηλεκτρικές ιδιότητες, είναι έτοιμος να εισαχθεί στον εργαστηριακό χώρο υπό την καθοδήγηση των εργαζομένων της εταιρείας Meta Materials.

Αρχικά, παρατηρεί το περιβάλλον γύρω του όπου βρίσκονται όλα τα απαραίτητα υλικά και βοηθητικά όργανα, ακούει προσεκτικά τις οδηγίες που του δίνονται και πραγματοποιείται σύντομη εκπαίδευση, με σκοπό να αποκτήσει την πρέπουσα οικειότητα με τις πειραματικές διατάξεις.

Τελικά, επιμορφώνεται πάνω σε όλα τα εργαλεία που απαιτούνται, για να καταφέρει να διενεργήσει την πειραματική ακολουθία δίχως εμπόδια. Βρίσκεται σε θέση να λειτουργήσει πλήρως αυτόνομα αφού έχει αποκτήσει τις κατάλληλες γνώσεις.

#### 3.1.1 Ατομικά Μέτρα Προστασίας

Στον δυναμικό κόσμο της επιστημονικής εξερεύνησης, τα εργαστήρια αποτελούν την γενέτειρα πρωτοποριακών ανακαλύψεων και προόδων. Παρ' όλα αυτά, στην επιδίωξη της επιστημονικής γνώσης, είναι ζωτικής σημασίας να εντοπίζουμε και να δίνουμε προτεραιότητα στην προσωπική μας υγεία. Αυτή η αναγνώριση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν βρισκόμαστε μέσα σε εργαστηριακούς χώρους. Από τον προστατευτικό ρουχισμό μέχρι τον εξοπλισμό ασφαλείας, αυτά τα μέτρα διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στην προστασία των ατόμων, την πρόληψη ατυχημάτων και στην καλλιέργεια της συνήθειας υπεύθυνης επιστημονικής εξερεύνησης.

Κάθε φορά πριν εκκινήσουμε, παίρνουμε τα ακόλουθα απαραίτητα μέτρα προστασίας:

- 1) Τοποθέτηση διάφανων γυαλιών προστασίας για την αποφυγή εισχώρησης ξένων σωμάτων στην περιοχή των οφθαλμών των ματιών.
- 2) Φοράμε εξεταστικά γάντια μίας χρήσης κατασκευασμένα από ελαστικό νιτρίλιο (NBR) χωρίς πούδρα.

Δευτερεύοντα και προαιρετικά Μ.Α.Π. είναι:

- ❖ Χρήση λευκής εργαστηριακής ρόμπας για προστασία από λεκέδες.
- ❖ Χρήση μάσκας προσώπου για τις οσμές καθώς είναι ενοχλητικές μετά από λίγο χρονικό διάστημα.



Εικόνα 20: Μέτρα ατομικής προστασίας

Σε περίπτωση επαφής κάποιας ουσίας με το δέρμα, ξεπλένουμε με άπλετο νερό. Οι ουσίες που χρησιμοποιούμε δεν εμπεριέχουν κάποιο τοξικό κίνδυνο.

### 3.1.2 Εξοπλισμός Για Την Παρασκευή Των Δοκιμίων

Ο εργαστηριακός εξοπλισμός είναι ένα πολύτιμο πλεονέκτημα, στον τομέα της επιστημονικής έρευνας και ανακάλυψης, που χρησιμεύει ως εναρκτήριο για την πραγματοποίηση πολλαπλών πειραμάτων και αναλύσεων.

Ο επαγγελματικός εξοπλισμός είναι καίριας σημασίας στην εξασφάλιση αξιόπιστων αποτελεσμάτων, ωστόσο μια υποχρέωση που έχουμε ως μελετητές είναι να εξερευνήσουμε αν τα δείγματα μας εμφανίζουν επαναληψιμότητα. Η μελέτη της επαναληψιμότητας μας διαβεβαιώνει ότι το τελικό προϊόν, θα έχει παραπλήσιες διηλεκτρικές ιδιότητες ανεξάρτητα από τις φορές και την χρονική στιγμή που θα πράξουμε την πειραματική διαδικασία.

Σημαντικό είναι να αναφέρουμε ότι ακριβώς επειδή η διπλωματική εργασία στηρίζεται στην πειραματική της φύση, ο χρήστης-ερευνητής είναι ένας από τους πολλούς παράγοντες που επηρεάζει το πείραμα. Η συνέπεια του να κάνει χρήση του εξοπλισμού ,με τις ίδιες κινήσεις - τον ίδιο ρυθμό, ανεξάρτητα από τη φυσική του κατάσταση (χαρά, κούραση, πείνα κλπ.), θα διασφαλίσει ότι δεν θα είναι ο λόγος που πιθανώς τα αποτελέσματα του εμφανίζουν ασυμφωνία. Σε αυτό το σενάριο, θα γνωρίζει ότι τα μετρητικά του όργανα ίσως εμφανίζουν κάποιο σφάλμα, εφόσον οι περιβαλλοντικές συνθήκες δεν τροποποιούνται.

Από τον προσεκτικό χειρισμό του εργαστηριακού εξοπλισμού, προετοιμάζουμε τα δοκίμια που θα αναλύσουμε αργότερα. Αυτός αποτελείται από διάφορες συσκευές

και μετρητικά όργανα, καθένα από τα οποία εξυπηρετεί συγκεκριμένο σκοπό, όπως η εισαγωγή ουσιών, αλλαγή θερμοκρασίας, εξαερισμός, αποθήκευση και πολλά άλλα.

Διαχωρίζουμε τον εξοπλισμό παρασκευής καλουπιών σε 2 κύριες κατηγορίες:

- i. Στις εργαστηριακές συσκευές-εργαλεία, που σκοπός τους είναι να μας βοηθήσουν να πραγματοποιήσουμε ομαλά τη διαδικασία του πειραματικού πρωτόκολλου.

Όργανο μέτρησης μάζας: Το εργαστήριο είναι ήδη εξοπλισμένο με το ζυγό Kern EMB 500-1, ο οποίος έχει διακριτική ικανότητα ενός δεκαδικού ψηφίου (0,1 g). Αποτελείται από 2 κουμπιά ON/TARE και OFF. Η λειτουργία του ON είναι να ενεργοποιήσει τη συσκευή, η χρήση του TARE είναι για να λαμβάνει το απόβαρο και το OFF απενεργοποιεί τη ζυγαριά. Όσον αφορά τις μετρητικές ικανότητες του, έχει την ικανότητα να αναπαράγει την ίδια τιμή βάρους για ένα συγκεκριμένο σώμα (αναπαραγωγιμότητα) σε τάξη μεγέθους 0,1 g. Ακόμη, η ικανότητα του οργάνου να εμφανίζει την σωστή μέτρηση σε όλο το εύρος ζύγισης (γραμμικότητα) είναι ίση με  $\pm 0,2 \text{ g}$  και ο χρόνος σταθεροποίησης που πρέπει να περιμένουμε, για να λάβουμε τη μέτρηση ισούται με 2-3 sec. Η ζυγαριά πρέπει να χρησιμοποιείται όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος κυμαίνεται από  $+5^{\circ}\text{C}$  έως  $+35^{\circ}\text{C}$ . Η διάμετρος της πλάκας ισούται με 150 mm. Τέλος, το μέγιστο βάρος που μπορεί να αντιληφθεί είναι ίσο με 500 g.

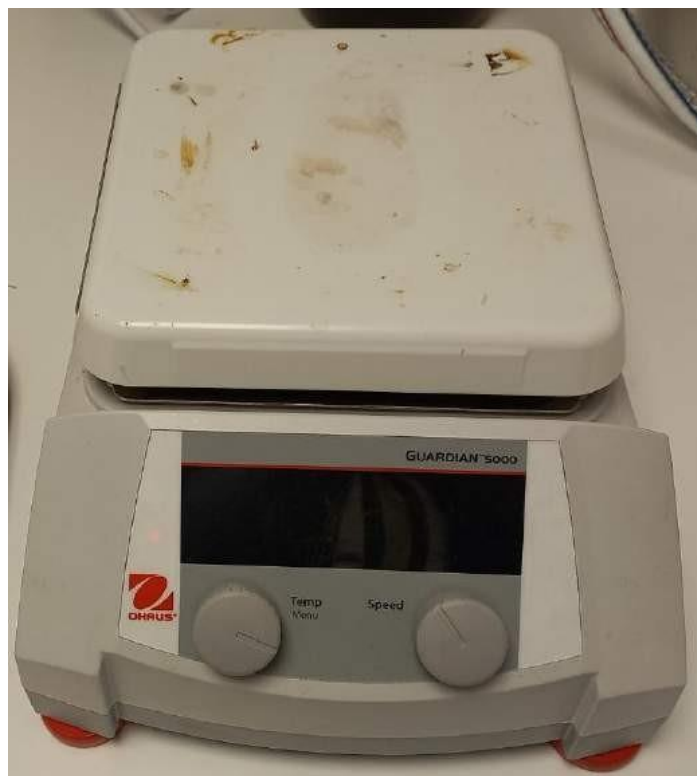


Εικόνα 21: Εργαστηριακός ζυγός Kern EMB 500-1

Όργανο αλλαγής θερμοκρασίας: Η θερμαντική πλάκα Ohaus Guardian 5000 διαστάσεων 30,7 x 22,4 x 12,2 cm (μήκος, πλάτος, ύψος) μας εξυπηρετεί για τις ανάγκες θέρμανσης του μείγματος στις απαραίτητες θερμοκρασίες που ορίζονται στο πρωτόκολλο. Η πάνω επιφάνεια της θερμαινόμενης πλάκας διαστάσεων 17,8 x 17,8 cm, αποτελείται από κεραμικό υλικό και εμφανίζει σταθερότητα



θερμοκρασίας  $\pm 2 \%$ , για θερμοκρασίες κάτω των  $100^{\circ}\text{C}$ . Η σταθερότητα της θερμοκρασίας εμφανίζεται σε επιφάνεια κύκλου με διάμετρο 5,1 cm και κέντρο, το γεωμετρικό κέντρο της πάνω επιφάνειας. Η συσκευή έχει 2 περιστρεφόμενους διακόπτες, εμείς ασχολούμαστε μόνο με αυτόν που μεταβάλλει τη θερμοκρασία (αριστερός διακόπτης). Για να ξεκινήσουμε τη θέρμανση της πλάκας, την ενεργοποιούμε, περιστρέφουμε το διακόπτη στην επιθυμητή θερμοκρασία, πιέζουμε και κρατάμε τον επιλογέα μέχρι να ακούσουμε το χαρακτηριστικό ήχο. Αντίστοιχα, περιστρέφουμε και πατάμε μια φορά το κουμπί προς τα μέσα για να αλλάξουμε την τιμή.

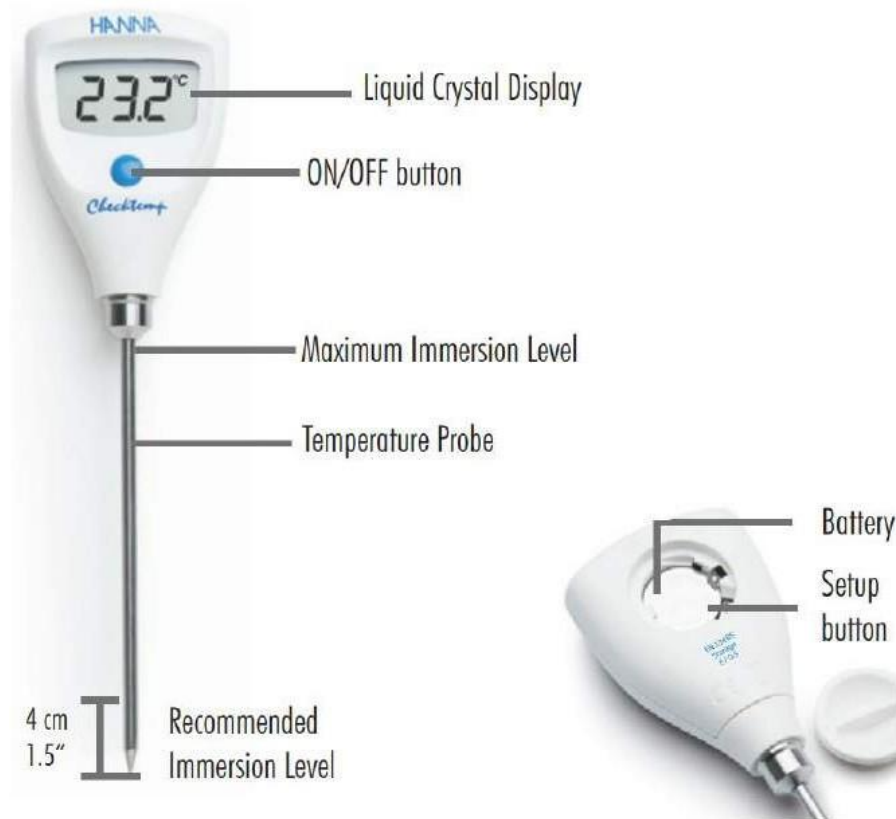


Εικόνα 22: Θερμαντική πλάκα Ohaus Guardian 5000

Όργανο μέτρησης θερμοκρασίας: Για τη μέτρηση των θερμοκρασιών, χρησιμοποιούμε ψηφιακό θερμόμετρο Checktemp HI-98501, το οποίο συμμορφώνεται με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN13485:2001. Το υλικό του μετρητή είναι φτιαγμένο από ανοξείδωτο χάλυβα. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά επισυνάπτονται παρακάτω.

Τεχνικά χαρακτηριστικά θερμομέτρου Checktemp HI-98501	
Εύρος μέτρησης	$-50^{\circ}\text{C}$ έως $+150^{\circ}\text{C}$
Διακριτική ικανότητα	$0,1^{\circ}\text{C}$
Διαστάσεις	50 x 185 x 21 mm
Ακρίβεια μέτρησης	$\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ για θερμοκρασία από $-30^{\circ}\text{C}$ έως $120^{\circ}\text{C}$ Και $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ για θερμοκρασία από $-50^{\circ}\text{C}$ έως $-30^{\circ}\text{C}$ και $120^{\circ}\text{C}$ έως $150^{\circ}\text{C}$

Πίνακας 5: Τεχνικά χαρακτηριστικά θερμομέτρου μέτρησης



Εικόνα 23: Θερμόμετρο Checktemp HI-98501

Όργανο και δοχείο ανάδευσης: Για τη ανάμειξη των ουσιών κάνουμε χρήση ηλεκτρονικού αναδευτήρα κάθετης περιστροφής Ibx Instruments OS20 Series με περιστρεφόμενη πτερωτή. Το εύρος ταχύτητας περιστροφής του είναι από 50 έως 2.200 rpm. Έχει εξωτερικές διαστάσεις 186 x 83 x 220 mm (μήκος x πλάτος x ύψος) και η διάμετρος του αναδευτήρα ισούται με 50 mm.



Εικόνα 24: Αναδευτήρας διαμέτρου 50 mm



Εικόνα 25: Λειτουργία & χειρισμοί αναδευτήρα



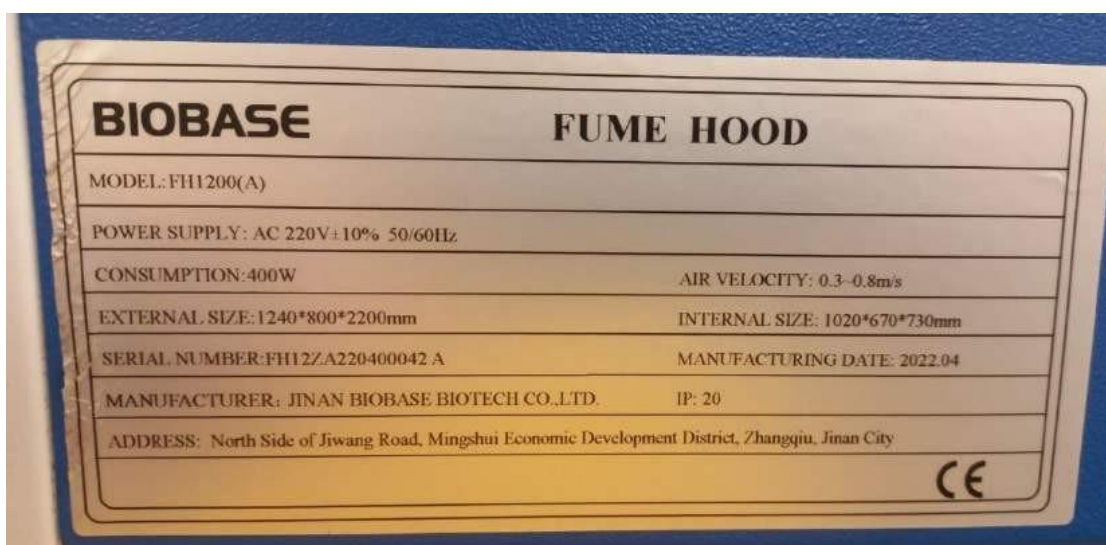
Εικόνα 26: Εργαστηριακή διάταξη αναδευτήρα

Επιπλέον, κατά τη διάρκεια του πειράματος, κάνουμε χρήση ποτηριών ζέσεως με διαφορετικούς όγκους. Συγκεκριμένα, ένα ποτήρι ζέσεως αξιοποιείται ως το δοχείο που αναμιγνύουμε-θερμαίνουμε τις ουσίες μας και το άλλο για να μεταφέρουμε τα συστατικά στο δοχείο ανάδευσης. Μερικές φορές, το ρόλο του γυάλινου ποτηριού ζέσεως λαμβάνει ένα απλό πλαστικό ποτήρι.



Εικόνα 27: Ποτήρι ζέσεως & πλαστικό ποτήρι

Μηχανισμός εξαερισμού: Για την απομάκρυνση των οσμών που παράγονται κατά την πειραματική διαδικασία, χρησιμοποιούμε τον απορροφητήρα της εταιρείας BIOBASE μοντέλο FH1200 (A). Τα πλεονεκτήματά του είναι ότι έχει λάμπα υπεριώδους ακτινοβολίας για απολύμανση του χώρου, 9 μεταβαλλόμενες ταχύτητες αέρα, μεταβαλλόμενο ύψος μπροστινού προστατευτικού γυαλιού και 2 θυρίδες για παροχή ρεύματος σε ηλεκτρονικές συσκευές. Τέλος, στο κάτω μέρος του έχει ντουλαπάκια για αποθηκευτικό χώρο.



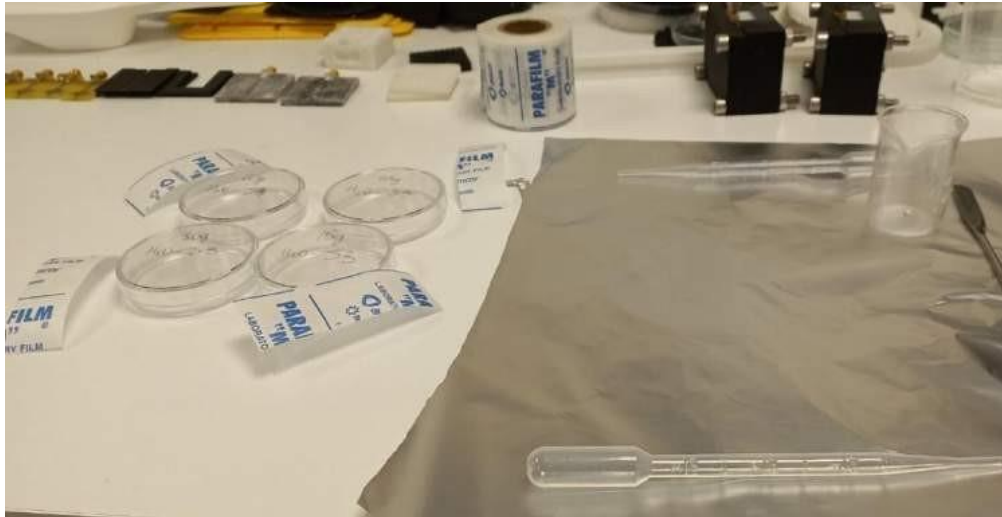
Εικόνα 28: Τεχνικά χαρακτηριστικά απορροφητήρα



Εικόνα 29: Απορροφητήρας εργαστηριακού χώρου

Λοιπά εργαλεία:

- a. Εργαστηριακά κυκλικά καλούπια.
- b. Πλαστική πιπέτα χωρητικότητας όγκου 3 mL, με σκοπό να προσφέρουμε με ακρίβεια μικρές ποσότητες ουσίας.
- c. Μεταλλική διπλή σπάτουλα εργαστηρίου για την ανάμειξη των ουσιών από το χρήστη καθώς και σπάτουλα εργαστηρίου με κουταλάκι για την εισαγωγή ουσιών στο πείραμα.
- d. Αλουμινόχαρτο, όπου ακουμπάμε τις πλαστικές πιπέτες, τη μεταλλική σπάτουλα και το μεταλλικό κουτάλι. Επιπλέον, προστατεύει τον εργαστηριακό πάγκο από υγρά και λοιπές βρωμιές.
- e. Φιλμ σφράγισης για τη στεγανοποίηση του καλουπιού.

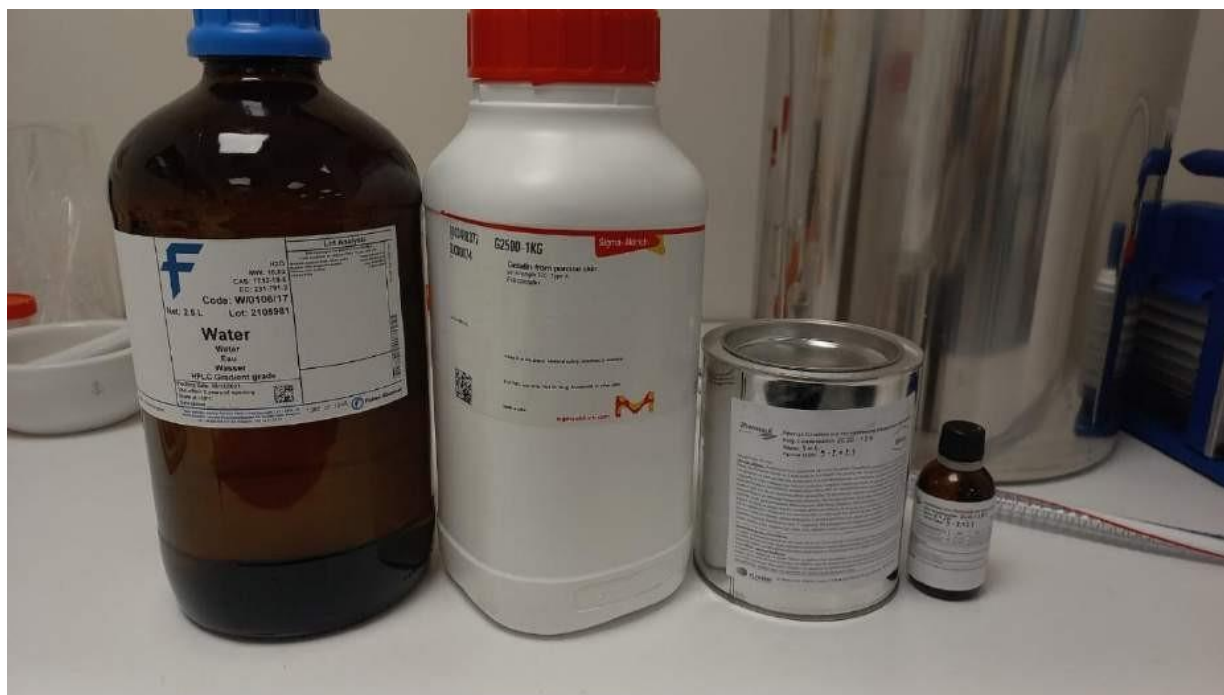


Εικόνα 30: Διάφορα χρήσιμα εργαλεία (πλαστικές πιπέτες, εργαστηριακά κυκλικά καλούπια, φιλμ σφράγισης, αλουμινόχαρτο)



Εικόνα 31: Μεταλλικές εργαστηριακές σπάτουλες

- ii. Στα υλικά που απαιτούνται για να δημιουργήσουμε τα εξεταζόμενα δοκίμια, τα οποία θα τεθούν υπό ανάλυση.
  1. Απιονισμένο νερό: Δεν χρησιμοποιούμε νερό βρύσης καθώς πιθανώς η χημική σύσταση του αλλάζει έστω και ελάχιστα, ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Το απιονισμένο νερό, μας διαβεβαιώνει ότι κάνουμε χρήση ενός συστατικού που έχει σταθερές ιδιότητες και σύσταση. Η διηλεκτρική σταθερά του απιονισμένου νερού ισούται με  $\epsilon_{r,DI \text{ water}} \cong 78,5$  σε θερμοκρασία  $25^{\circ}\text{C}$ .
  2. Χοιρινή ζελατίνη σε μορφή σκόνης: Η ζελατίνη έχει την ικανότητα να πήξει διαλύματα, όταν αναμειγνύεται εξ' ολοκλήρου με υγρά δηλαδή είναι το πηκτικό μας μέσο. Μας δίνει πιο «σταθερά» μίγματα, τα οποία σταθεροποιούνται γρηγορότερα όταν τα τοποθετούμε σε κρύο περιβάλλον.
  3. Δάστιχο Σιλικόνης: Η χαμηλή τιμή της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς του μέσου ίση με 3-3,5 για συχνότητα 1 MHz, την καθιστά απαραίτητη για να πετύχουμε τις τελικές τιμές που επιθυμούμε στα δοκίμια μας.
  4. Σκληρυντής/Καταλύτης: Η δουλειά του σκληρυντή είναι να πολυμερίσει τη βάση του διαλύματος (σιλικόνη). Δεν επηρεάζει την τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς.



Εικόνα 32: Υλικά για τη δημιουργία σύνθετου υλικού

### 3.2 Εξοπλισμός Μέτρησης Διηλεκτρικής Σταθεράς $\epsilon_r$ '

Προκειμένου να εκτιμηθεί με ακρίβεια και να μετρηθεί η διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r$ ' των πειραματικών προϊόντων, καθίσταται επιτακτική η χρήση του εξειδικευμένου εξοπλισμού. Παρέχοντας ακριβείς και αξιόπιστες μετρήσεις, μπορούμε να διασταυρώσουμε πόσο κοντά είναι η θεωρία με την πράξη και να βελτιώσουμε το πρωτόκολλο δημιουργίας σύνθετου υλικού. Σκοπός μας είναι να αναδείξουμε το κύριο σύστημα αξιολόγησης της διηλεκτρικής σταθεράς και να ακολουθήσουμε τα σωστά βήματα κατά τη διάρκεια χρήσης του.

Το κύριο σύστημα αξιολόγησης αποτελείται από 4 στοιχεία:

- Διανυσματικός αναλυτής δικτυωμάτων (VNA), της ιαπωνικής εταιρείας Anritsu σειράς ShockLine™ μοντέλο MS46122B-010 με εύρος συχνότητας από 1 MHz – 8 GHz. Έχει 2 θυρίδες που απευθύνονται σε εφαρμογές ραδιοσυχνότητας και μικροκυματικές συχνότητες για οργανισμούς παραγωγής, μηχανικής και εκπαίδευσης. Στο δεξιό μέρος, έχει μία μικρή θύρα USB τύπου B για να συνδεθεί με έναν εξωτερικό υπολογιστή. Συστήνεται ο εξωτερικός υπολογιστής να έχει τουλάχιστον τα εξής χαρακτηριστικά :

- ✓ Κεντρική μονάδα επεξεργαστή (CPU): Intel Core i5-6300U Processor
- ✓ Μνήμη τυχαίας προσπέλασης (RAM): 4 GB
- ✓ Σκληρό δίσκο (Hard disk): 120 GB

Ο διανυσματικός αναλυτής συμμορφώνεται με πολλαπλά κανονιστικά πρότυπα/οδηγίες που έχει θέσει η ευρωπαϊκή ένωση, όπως το EMC 2014/30/EU που ρυθμίζει την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα του εξοπλισμού, το CISPR 11/ EN 55011 που παρέχει πληροφορίες για τον βιομηχανικό, επιστημονικό και ιατρικό εξοπλισμό σχετικά με τα χαρακτηριστικά των ραδιοφωνικών διαταραχών για τη συμμόρφωση με την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα κλπ.

Το εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας του μηχανήματος είναι από 0°C έως +50°C (Anritsu Company, 2022).

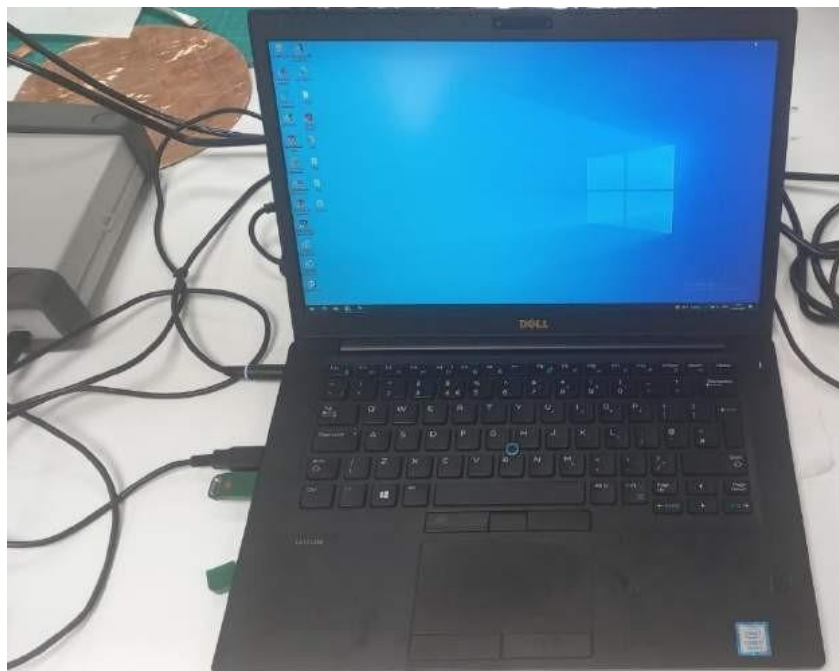


Εικόνα 33: Διανυσματικός αναλυτής δικτυωμάτων Anritsu (VNA)

- Ο εξωτερικός υπολογιστής Dell latitude E7480, ο οποίος έχει επιλεγθεί με βάση τις απαιτήσεις για να λειτουργεί επιθυμητά το VNA.

A/A	Απαιτούμενα	Dell latitude E7480
Κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU)	Intel Core i5-6300U Processor	Intel Core i7-7600U Processor
Μνήμη τυχαίας προσπέλασης (RAM)	4 GB	16 GB
Σκληρός δίσκος (Hard disk)	120 GB	512 GB

Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά εξωτερικού υπολογιστή συγκριτικά με τα απαιτούμενα



Εικόνα 34: Εξωτερικός υπολογιστής Dell



- Εργαλειοθήκη διηλεκτρικής αξιολόγησης DAK, της εταιρείας SPREAG, που εδρεύει στην Ελβετία και παρέχει εξοπλισμό για ακριβείς μετρήσεις διηλεκτρικών παραμέτρων όπως η αγωγιμότητα  $\sigma$ , η διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r$  κλπ. Αυτές οι μετρήσεις μπορούν να ληφθούν σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων που εκτείνεται από 4 MHz έως 3 GHz με τον DAK 12 δηλαδή τον ομοαξονικό διηλεκτρικό αισθητήρα ανοικτού άκρου. Ο ανιχνευτής (probe) συνδέεται με ασφάλεια στο βραχίονα στήριξης και συνδέεται στο VNA μέσω ενός καλωδίου υψηλής ποιότητας. Ο σκοπός του DAK 12 είναι να προσδιορίσει με ακρίβεια τα διηλεκτρικά χαρακτηριστικά υγρών, στερεών και ημι-στερεών υλικών που είναι ομοιόμορφες και έχουν τις ίδιες ιδιότητες προς όλες τις κατευθύνσεις.



Εικόνα 35: Κιτ διηλεκτρικής αξιολόγησης Spreag

Το σύνολο διηλεκτρικής αξιολόγησης περιέχει:

✓ Ανιχνευτή DAK 12, με τα εξής:

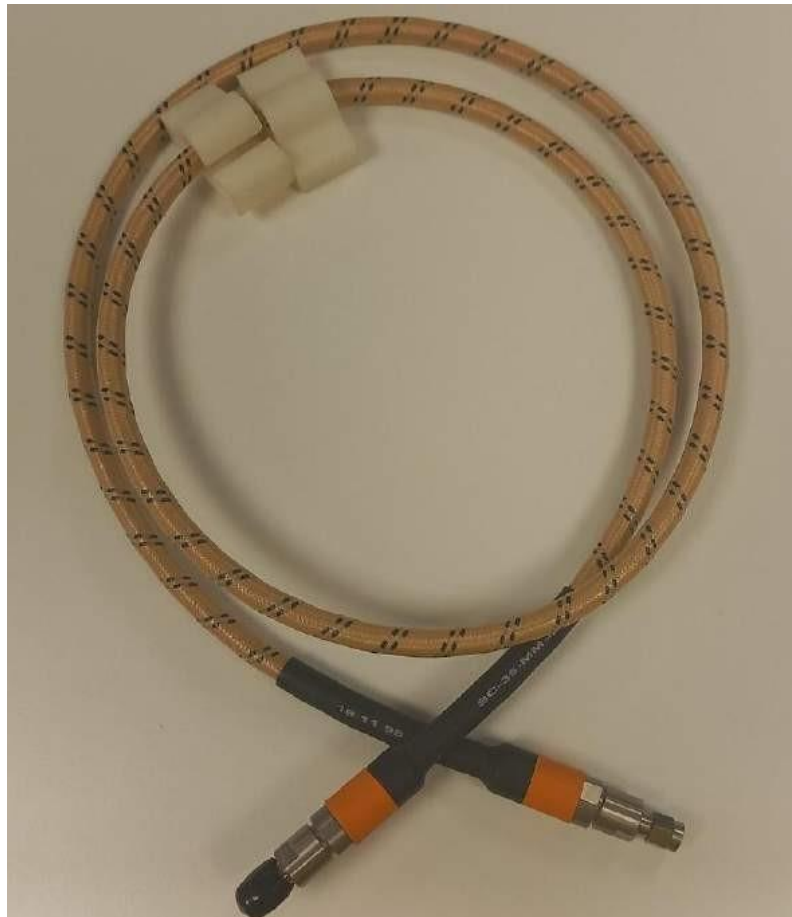
Τύπος συνδέσμου ανιχνευτή	3,5 mm αρσενικό βύσμα
Εσωτερική διάμετρος εξωτερικού αγωγού	12 mm
Εσωτερική διάμετρος αγωγού	3,18 mm
Διάμετρος φλάντζας	48 mm
Υλικό διηλεκτρικής χάντρας	Eccosotck 0005
Υλικό φλάντζας	Ανοξείδωτος χάλυβας
Μήκος βύθισης	50 mm
Ανθεκτικότητα	Υψηλή αντοχή σε διαβρωτικά υλικά
Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας	0°C - 60°C
Επαναληψιμότητα μέτρησης	Τυπικά εντός $\pm 1\%$
Ακρίβεια	Υπάρχουν πίνακες αβεβαιότητας με βάση τις ιδιότητες του υλικού και τη συχνότητα

Πίνακας 7: Τεχνικά χαρακτηριστικά ανιχνευτή DAK 12

- ✓ USB, το οποίο περιέχει την άδεια χρήσης για το πρόγραμμα του υπολογιστή που χρειαζόμαστε για να λάβουμε τις μετρήσεις.
- ✓ Μπλοκ και σετ μεταλλικών λωρίδων χαλκού και υφάσματος, που μαζί χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση του ανιχνευτή. Οι ταινίες πρέπει να είναι καθαρές και να μην έχουν οξειδωθεί για να είναι ικανή η ηλεκτρική επαφή με τον αισθητήρα. Για μετρήσεις συχνότητας κάτω των 500 MHz κάνουμε χρήση των υφασμάτων λωρίδων, ενώ για άνω των 500 MHz χρησιμοποιούμε τις χάλκινες.
- Καλώδιο ευστάθειας. Τα πλεονεκτήματα του είναι ότι σταθεροποιεί το πλάτος και τη φάση του σήματος, έτσι μας παράγει αξιόπιστες και επαναλαμβανόμενες μετρήσεις. Δεν πρέπει να κουνηθεί κατά τη διάρκεια των μετρήσεων γιατί θα έχουμε εσφαλμένη τιμή. Εμείς χρησιμοποιούμε το καλώδιο Stability SC-35-MM-48 της εταιρείας Maury Microwave, το οποίο είναι κατάλληλο για διανυσματικούς αναλυτές δικτυωμάτων (VNA), όργανα RF και μικροκυμάτων. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του SC-35-MM-48 είναι τα ακόλουθα:

STABILITY™ τύπος καλωδίου	SC-35
Μέγιστη συχνότητα f	26,5 GHz
Τυπική σταθερότητα φάσης με κάμψη	$\pm 3,5^\circ$
Τυπική σταθερότητα πλάτους με κάμψη	$\pm 0,02$ db
Υλικό κεντρικού αγωγού	Ασημένιος επιχαλκωμένος χάλυβας
Υποδοχή 1 & 2	3,5 mm αρσενικό βύσμα
Μήκος	122 cm (48 inches)

Πίνακας 8: Τεχνικά χαρακτηριστικά καλωδίου ευστάθειας Stability SC-35-MM-48

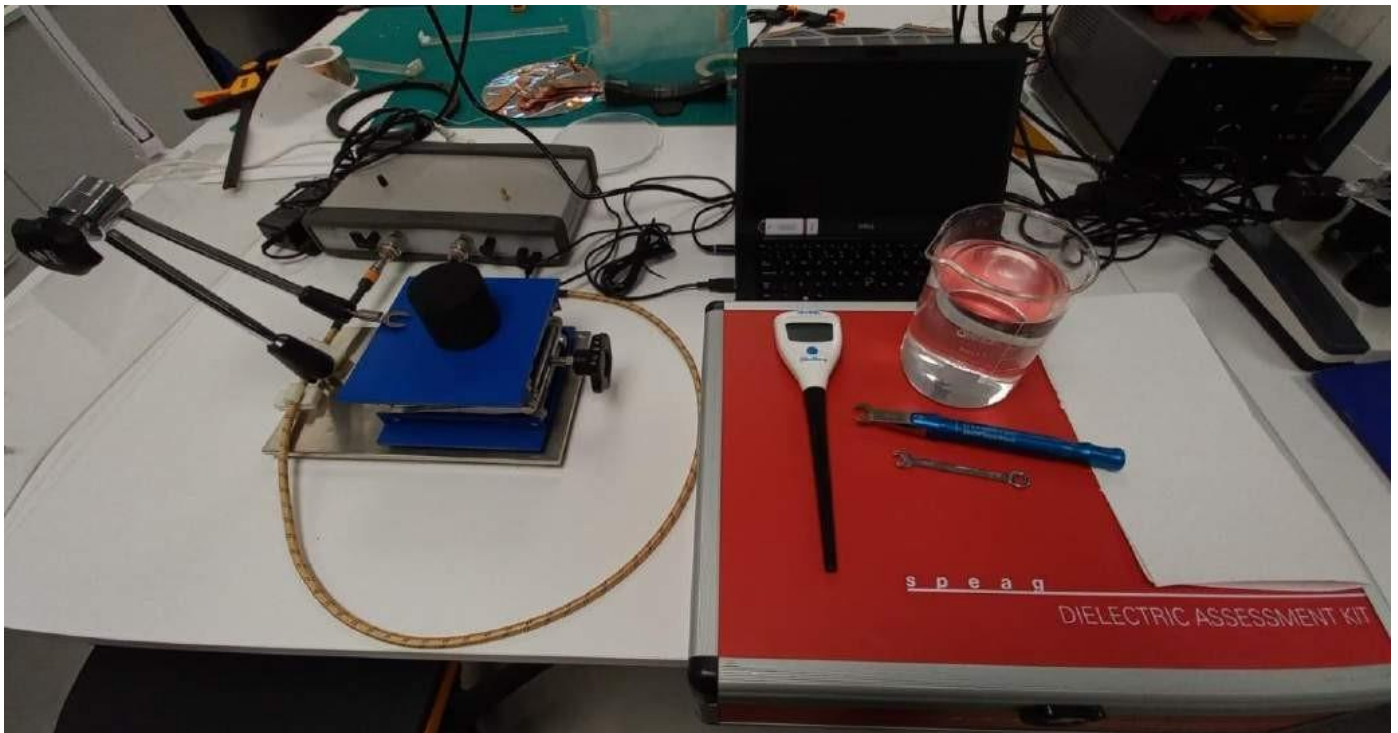


Εικόνα 36: Καλώδιο σταθερότητας Stability™ SC-35-MM-48



Εικόνα 37: Ανατομία καλωδίου σταθεροποίησης

Φυσικά, έχουμε βοηθητικά (δευτερεύοντα) εργαλεία όπως ροπόκλειδα, μοχλό στήριξης για την σταθεροποίηση του ανιχνευτή (probe), βάση στήριξης που ανυψώνει το μαύρο κυλινδρικό μπλοκ, το οποίο χρησιμοποιείται ως επιφάνεια έδρασης για το εξεταζόμενο σύνθετο υλικό, ηλεκτρονικό θερμόμετρο, απιονισμένο νερό, χαρτί κουζίνας για τον καθαρισμό του εξοπλισμού και USB για να αποθηκεύσουμε τα δεδομένα μας.



Εικόνα 38: Απαιτούμενος εξοπλισμός για τη βαθμονόμηση του VNA και για τις μετρήσεις διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r$

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Πειραματική Διαδικασία

### 4.1 Εισαγωγή

Η σημασία των πειραματικών διαδικασιών δεν μπορεί να αμεληθεί στην επιστημονική έρευνα και στην αναζήτηση της γνώσης. Αυτές προσφέρουν ένα δομημένο πλαίσιο για τη διεξαγωγή πειραμάτων, επιτρέποντας σε εμάς να συλλέξουμε δεδομένα, να επαληθεύσουμε θεωρητικές υποθέσεις και να εξάγουμε διορατικά συμπεράσματα. Ο σχολαστικός σχεδιασμός και η εφαρμογή των πειραματικών διαδικασιών είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της ακρίβειας και της συνέπειας της επιστημονικής έρευνας σε διάφορα πεδία.

Ακολουθώντας ένα καλά προκαθορισμένο πρωτόκολλο, έχουμε τη δυνατότητα να ελαχιστοποιήσουμε την μεροληψία, να ελέγξουμε τις μεταβλητές μας και να επαναλάβουμε το πείραμα δίχως να διαφοροποιείται το τελικό αποτέλεσμα. Το πρωτόκολλο περιγράφει την απαραίτητη αλληλουχία βημάτων που είναι αναγκαίο να ακολουθηθεί κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας.

### 4.2 Αρχικό Πρωτόκολλο Δημιουργίας Δοκιμίων

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, τα πειραματικά συστατικά μας είναι το απιονισμένο νερό, η χοιρινή ζελατίνη σε σκόνη, το λάστιχο σιλικόνης & ο καταλύτης. Η υπάρχουσα μελέτη που έχει ήδη πραγματοποιηθεί από το εργαστηριακό προσωπικό για τη δημιουργία σύνθετου υλικού, έχει τις ακόλουθες προϋποθέσεις :

- a. Μας ενδιαφέρει βασικά η αναλογία των υλικών και όχι τόσο οι ποσότητες τους σε γραμμάρια. Μέγιστη αναλογία που έχει μελετηθεί είναι 3:1 απιονισμένο νερό – σιλικόνη (Μέγιστη ποσότητα νερού = 30 g).
- b. Αναλογία κατά βάρος απιονισμένου νερού – χοιρινής ζελατίνης 3 προς 1.
- c. Η σιλικόνη θα έχει κάθε φορά σταθερή τιμή ίση με 10 g.
- d. Η αναλογία καταλύτη σε σιλικόνη 3-5 % κατά βάρος.

Γενικά, είναι επιτακτικό να δώσουμε έμφαση στις αναλογίες των υλικών καθώς παρέχουν ένα τυποποιημένο πλαίσιο για τη διεξαγωγή πειραμάτων και από άλλους ερευνητές δηλαδή τους επιτρέπει να επαναλάβουν το πείραμα και να επιτύχουν παρόμοια αποτελέσματα. Επιπλέον, εστιάζοντας στις αναλογίες ελαχιστοποιούμε τις επιπτώσεις των σφαλμάτων μέτρησης λαμβάνοντας έτσι πιο αξιόπιστα δεδομένα.

Η συγκεκριμένη αναλογία απιονισμένου νερού – ζελατίνη 3:1 ήταν το μέγιστο που πειραματικά λειτουργούσε, καθώς περισσότερο νερό έκανε το μείγμα πολύ νεροούλο και δεν έπηξε. Η αναλογία καταλύτη-σιλικόνη ορίζεται από τον κατασκευαστή. Η σταθερή ποσότητα 10g της σιλικόνης επιλέχθηκε διότι έτσι προκύπτει αρκετή ποσότητα τελικού σύνθετου υλικού για να γίνει η μέτρηση. Η μέγιστη τιμή διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r'$ , που έχει μετρηθεί σε δοκίμιο από το προσωπικό ήταν ίση με  $\epsilon_r'_{\max} = 40$ .

Ο φοιτητής για να διαφοροποιηθεί λιγάκι, επιλέγει να ασχοληθεί με μεγαλύτερο εύρος αναλογίας απιονισμένου νερού-σιλικόνης και πιο συγκεκριμένα να το επεκτείνει από 3:1 σε 6:1. Διαλέγουμε να χωρίσουμε το διάστημα του απιονισμένου νερού σε 4 ίσα μέρη δηλαδή θα δημιουργήσουμε και θα διερευνήσουμε πρακτικά 4 μείγματα.

Θεωρητικές Τιμές				
α/α	Απιονισμένο Νερό (g)	Ζελατίνη (g)	Σιλικόνη (g)	Καταλύτης (g)
Μείγμα 1	15,0	5,0	10,0	0,3
Μείγμα 2	30,0	10,0	10,0	0,3
Μείγμα 3	45,0	15,0	10,0	0,3
Μείγμα 4	60,0	20,0	10,0	0,3

Πίνακας 9: Μείγματα προς ανάλυση

Για την εξέταση της επαναληψιμότητας του πειράματος, θα δημιουργήσουμε 3 σειρές δοκιμίων για αυτά τα 4 μείγματα. Επομένως, θα παράγουμε συνολικά 12 μείγματα.

Για τη μελέτη και πειραματική ανάλυση ιδιοτήτων σύνθετου υλικού, ακολουθούμε το ήδη αναπτυγμένο πρωτόκολλο για την κατασκευή καλουπιών, το οποίο είναι το ακόλουθο:

#### Αρχικό Πρωτόκολλο

- 1) Ενεργοποιούμε τη θερμαινόμενη πλάκα και τη θέτουμε σε θερμοκρασία 40°C.



Εικόνα 39: Αρχική θερμοκρασία

- 2) Περιμένουμε μέχρι η επιφάνεια της πλάκας να φτάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία.
- 3) Αναμιγνύουμε το απιονισμένο νερό με τη χοιρινή ζελατίνη σε ποτήρι ζέσεως/πλαστικό ποτήρι.



Εικόνα 40: Ανάμειξη απιονισμένου νερού & ζελατίνης

- 4) Τοποθετούμε το ποτήρι ζέσεως στη θερμαινόμενη πλάκα.
- 5) Αυξάνουμε τη θερμοκρασία στους 75°C.
- 6) Αναμιγνύουμε μέχρι η συγκεκριμένη θερμοκρασία να επιτευχθεί.
- 7) Μόλις φτάσουμε τους 75°C, συνεχίζουμε να αναμιγνύουμε για 6'.



Εικόνα 41: Ανάμειξη στους 75°C για 6'

- 8) Αφαιρούμε το ποτήρι ζέσεως από την πλάκα, προσθέτουμε την ποσότητα σιλκόνης, επιστρέφουμε το δοχείο στην πλάκα και αναμιγνύουμε για 2'30'' στους 75°C.



Εικόνα 42: Προσθήκη & ανάμειξη σιλικόνης στο μείγμα

- 9) Αφαιρούμε το ποτήρι ζέσεως από την πλάκα και αναμιγνύουμε για 1'30''.
- 10) Επανατοποθέτηση δοχείου στην πλάκα και μίξη για 2'30'' στους 75°C.
- 11) Αφαιρούμε το ποτήρι από την πλάκα, μετράμε και προσθέτουμε την ποσότητα του καταλύτη στο μείγμα, ανάμειξη στους 75°C για 2'.

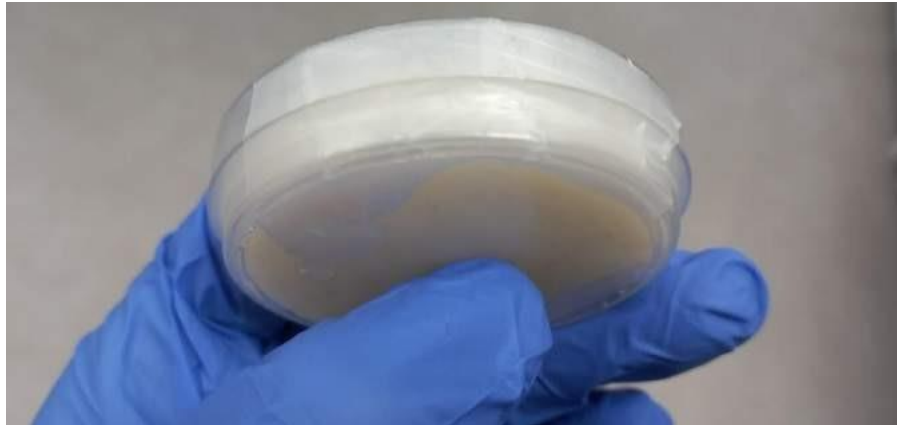


Εικόνα 43: Μέτρηση & προσθήκη καταλύτη στο μείγμα

- 12) Έγχυση στο καλούπι.



Εικόνα 44: Έγχυση εξεταζόμενου υλικού στο κυκλικό καλούπι  
13) Σφραγίζουμε με το φιλμ το εξεταζόμενο δοκίμιο και το τοποθετούμε στο ψυγείο για ψύξη



Εικόνα 45: Σφράγιση & τοποθέτηση στο ψυγείο

Αφήνουμε τα δοκίμια να ψυχθούν όλο το βράδυ και δεχόμαστε ότι η 1<sup>η</sup> μέτρηση μπορεί να πραγματοποιηθεί έως και 3 μέρες από την ημερομηνία κατασκευής τους καθώς το Σαββατοκύριακο δεν μπορούμε να λάβουμε μετρήσεις.

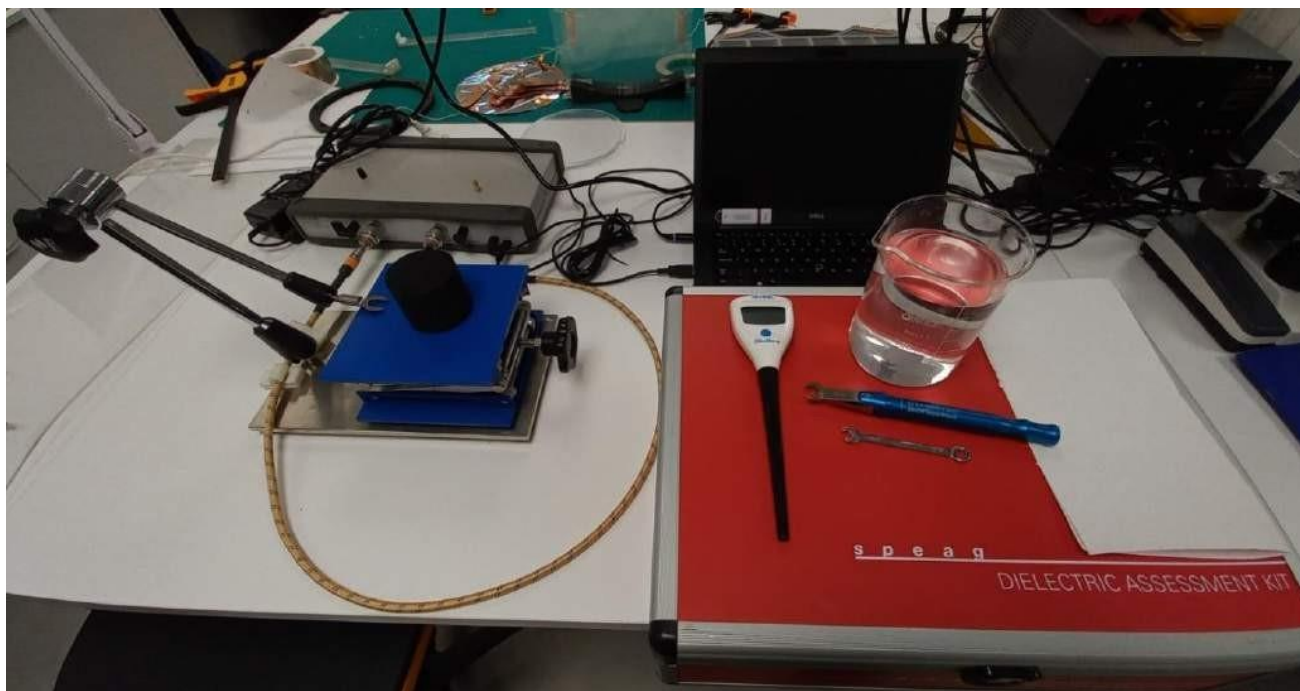
#### **4.3 Διαδικασία Συναρμολόγησης, Βαθμονόμησης & Πειραματικής Μέτρησης Διηλεκτρικής Σταθεράς $\epsilon_r$**

Η διαδικασία της βαθμονόμησης μας είναι ένα κρίσιμο βήμα για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της εγκυρότητας των πειραματικών μετρήσεων, γεγονός που μας επιτρέπει να κατανοήσουμε σε βάθος την ηλεκτρική ιδιότητα που μελετάμε στο σύνθετο υλικό. Με αυτόν τον τρόπο, είμαστε σε θέση να εξαλείψουμε πηγές συστηματικών σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν κατά τη διαδικασία της μέτρησης και έτσι μπορούμε να λάβουμε αξιόπιστες τιμές για τη διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r$ . Αυτό όχι μόνο ενισχύει τη συνολική ποιότητα της έρευνας μας, αλλά δίνει επίσης τη δυνατότητα να κάνουμε πιο ακριβείς μετρήσεις και να εξάγουμε καλύτερα συμπεράσματα.



### Διεργασία συναρμολόγησης μετρητικού συστήματος

Φέρνουμε όλο τον απαραίτητο εργαστηριακό εξοπλισμό κοντά μας.



Εικόνα 46: Σύστημα μέτρησης & βοηθητικά εργαλεία.

Πρώτα από όλα, ενεργοποιούμε το διανυσματικό αναλυτή δικτυωμάτων Anritsu MS46122B-010 (VNA), τον αφήνουμε να ζεσταθεί για τουλάχιστον 30' πριν ξεκινήσουμε οποιαδήποτε μέτρηση και ανοίγουμε τον εξωτερικό υπολογιστή. Το VNA επικοινωνεί με τον εξωτερικό υπολογιστή μέσω καλωδίου USB.



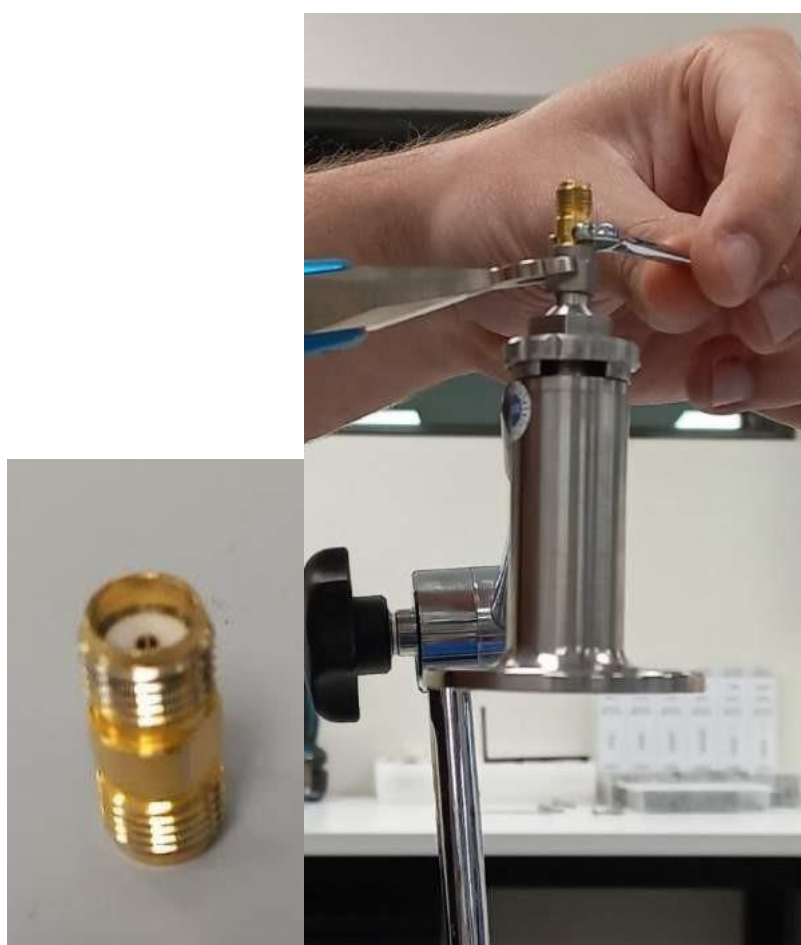
Εικόνα 47: Εκκίνηση VNA

Από την κόκκινη θήκη του σετ διηλεκτρικής αξιολόγησης, παίρνουμε τον ανιχνευτή DAK 12, καθαρίζουμε την κάτω επιφάνεια του με χαρτί κουζίνας και τον τοποθετούμε στο μοχλό στήριξης.



Εικόνα 48: Συγκράτηση ανιχνευτή (probe)

Τοποθετούμε κάθετα και σφίγγουμε με το ροπόκλειδο, το θηλυκό βύσμα που θα συνδέσει τον ανιχνευτή με το καλώδιο ευστάθειας.



Εικόνα 49: Σύνδεση θηλυκού βύσματος



Εικόνα 50: Σύνδεση καλωδίου σταθερότητας

Αυτό το στάδιο είναι κρίσιμο καθώς οι συνδέσεις μεταξύ των στοιχείων είναι αναγκαίο να γίνονται κάθετα και να μην εμφανίζεται τζόγος στο καλώδιο. Έτσι, προσπαθούμε να επηρεάζονται στο ελάχιστο οι μετρήσεις μας, από «λανθασμένη» συναρμολόγηση.

Τελικά, το καλώδιο ευστάθειας με τη σειρά του είναι συνδεδεμένο με το VNA και έχουμε έτοιμο κατασκευαστικά το σύστημα μέτρησης.

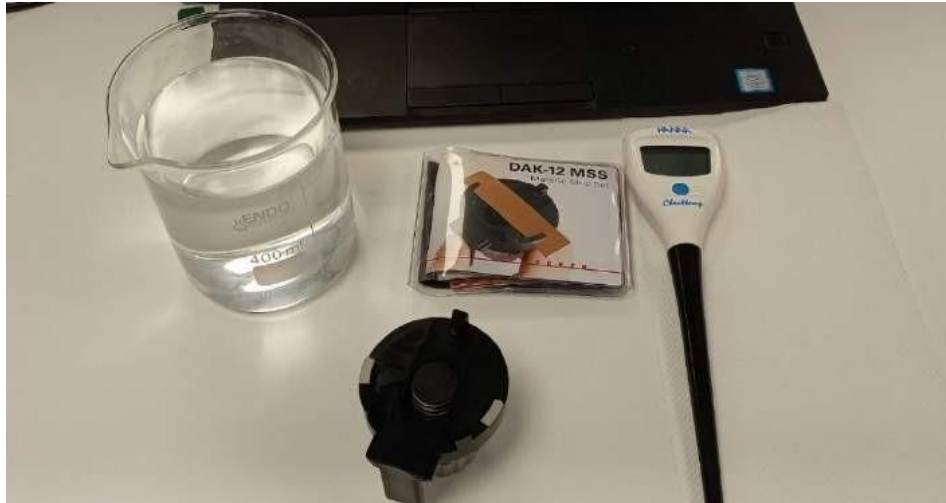


Εικόνα 51: Τελικό σύστημα μέτρησης

### Διαδικασία βαθμονόμησης

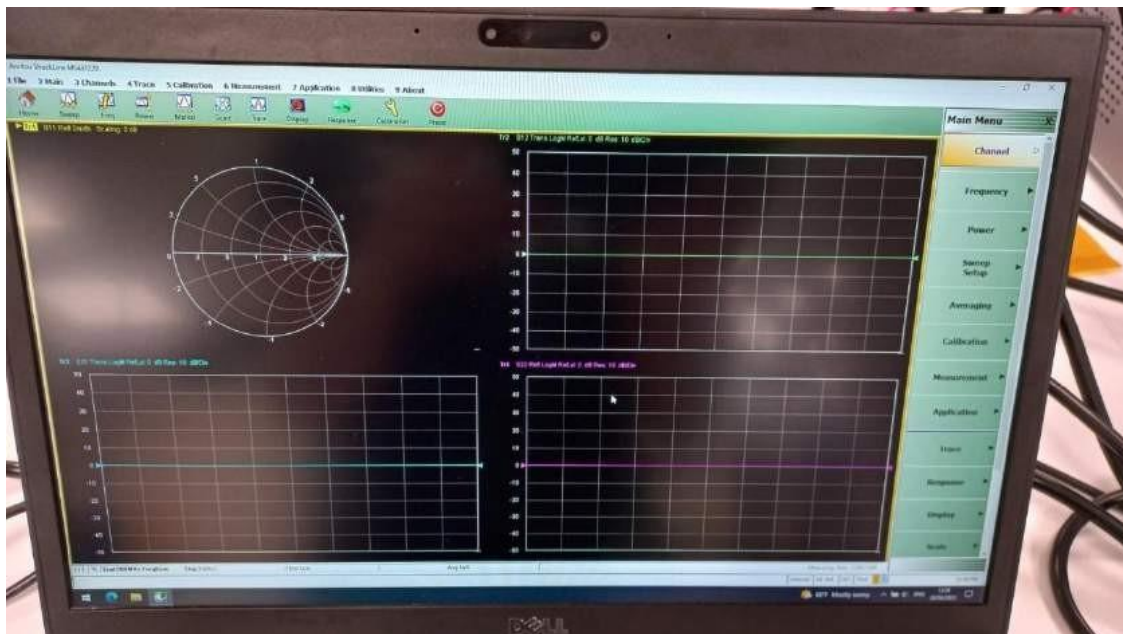
Με βάση τη μέθοδο μέτρησης μας, ομοαξονικός ανιχνευτής ανοιχτού άκρου (open-ended coaxial probe), κάνουμε χρήση μιας τυπικής διαδικασίας βαθμονόμησης τριών φορτίων για τη διόρθωση σφάλματος μιας θύρας (OSL Calibration Method)

Τα τρία διαφορετικά πρότυπα φορτία/υλικά μας είναι ο χαλκός, το απιονισμένο νερό και ο αέρας.

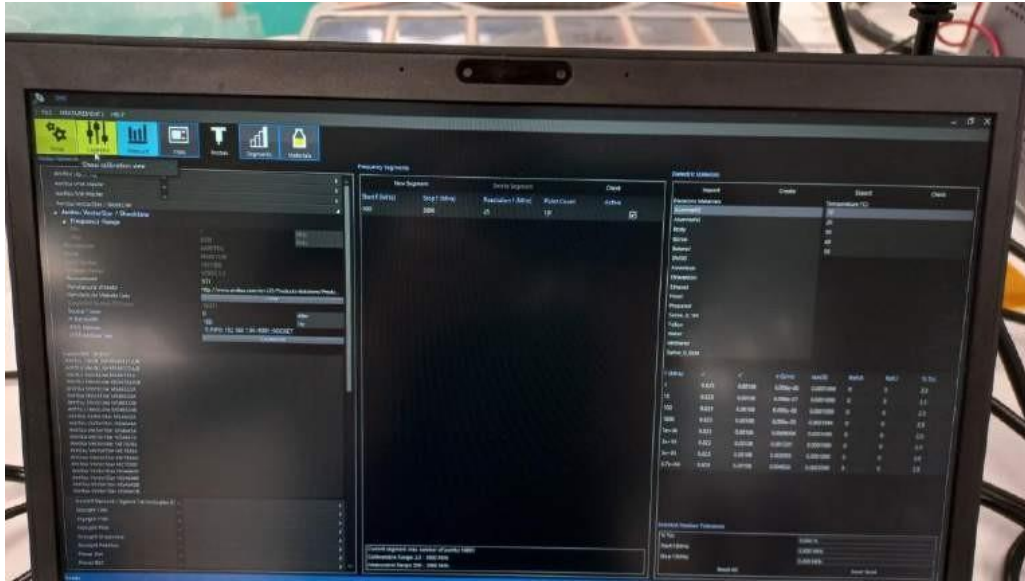


Εικόνα 52: Εξοπλισμός διόρθωσης σφάλματος θύρας

Εκκινούμε τα προγράμματα του υπολογιστή, ShockLine (για το VNA) και DAK 3.0.6.4, ωστόσο εμείς θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με την εφαρμογή για το DAK από όπου θα λάβουμε τις πειραματικές μετρήσεις μας. Ανοίγουμε και τις 2 εφαρμογές για είναι δυνατή η μέτρηση από τον ομοαξονικό ανιχνευτή (probe).



Εικόνα 53: Περιβάλλον εφαρμογής ShockLine



Εικόνα 54: Περιβάλλον εφαρμογής DAK

Τώρα, έχοντας το ποτήρι ζέσεως γεμάτο με απιονισμένο νερό μετράμε τη θερμοκρασία του. Βυθίζουμε το ηλεκτρονικό θερμόμετρο όσο περισσότερο γίνεται, έτσι ώστε να μην ακουμπάει τον πυθμένα του ποτηριού και περιμένουμε μέχρι να σταθεροποιηθεί η ένδειξη της θερμοκρασίας. Υποβάλλουμε την τιμή της θερμοκρασίας στο λογισμικό DAK και πατάμε το κουμπί βαθμονόμησης.



Εικόνα 55: Θερμοκρασία πρότυπου υλικού (απιονισμένο νερό) & εκκίνηση βαθμονόμησης

### Short Circuit Calibration

Το 1<sup>ο</sup> υλικό που μεταχειριζόμαστε για τη βαθμονόμηση είναι η μεταλλική λωρίδα χαλκού, η οποία με τη σειρά της εφαρμόζεται στο μπλοκ υποβοήθησης. Στη συνέχεια, το μπλοκ εφάπτεται και κλειδώνει πάνω στον ομοαξονικό ανιχνευτή, με τη βοήθεια των περιμετρικών γάντζων του. Εσωτερικά στο μπλοκ υπάρχει κοχλίας, όπου τον σφίγγουμε χρησιμοποιώντας τη γκρίζα ροδέλα, με σκοπό να φέρουμε σε επαφή τον ομοαξονικό ανιχνευτή και τη λωρίδα χαλκού.



Εικόνα 56: Εφαρμογή λωρίδας χαλκού στον ανιχνευτή



Εικόνα 57: Βαθμονόμηση Short Circuit

Παρατηρούμε ότι πριν τη βαθμονόμηση short circuit, έχουμε διασπαρμένα σημεία που δεν βρίσκονται στην αρχή των αξόνων (0,0). Με την επιλογή του κουμπιού short circuit, όλα τα σημεία μετατοπίζονται στο σημείο (0,0). Επομένως, ξέρουμε ότι οι μετρήσεις μας θα είναι αξιόπιστες. Αναλυτικότερες λεπτομέρειες, σχετικά με τη

βαθμονόμηση αναγράφονται στο κεφάλαιο 2. Συνεχίζοντας, αφαιρούμε το μπλοκ με το χαλκό, καθαρίζουμε προσεκτικά την επιφάνεια του ανιχνευτή με χαρτί κουζίνας και προχωράμε στο επόμενο υλικό/φορτίο, το απιονισμένο νερό.

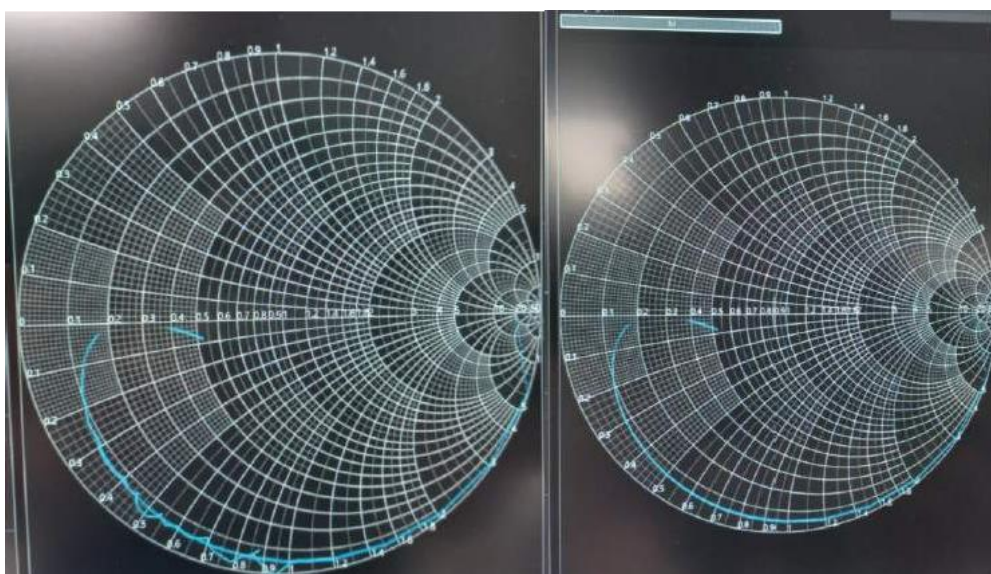
### Broadband/Liquid/Load Circuit Calibration

Τοποθετούμε πάνω στη βάση στήριξης, το ποτήρι ζέσεως και βυθίζουμε με αργό ρυθμό τον ομοαξονικό ανιχνευτή στο υγρό. Σε αυτό το στάδιο, είναι κρίσιμο να μη δημιουργηθούν φυσαλίδες στην επιφάνεια του ανιχνευτή.



Εικόνα 58: Βύθιση ομοαξονικού ανιχνευτή

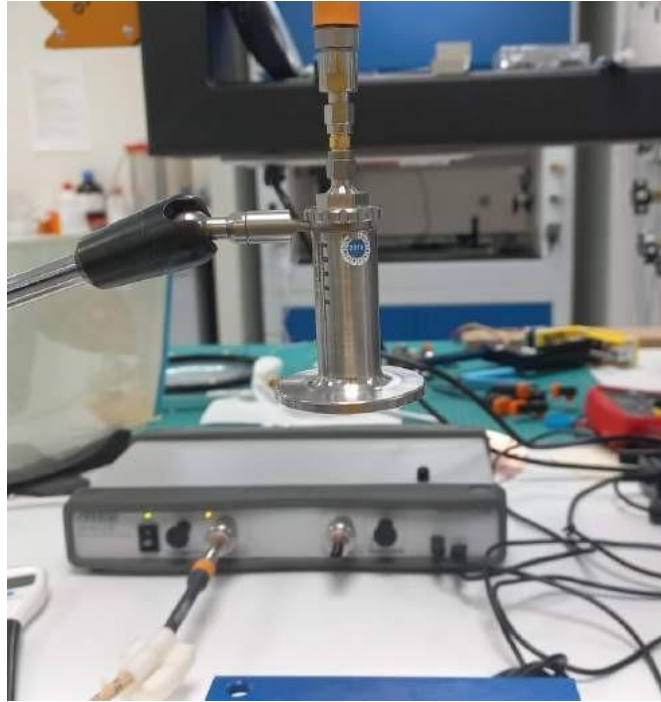
Στην αριστερή εικόνα, παρατηρούμε ότι υπάρχει μια τεθλασμένη γραμμή που είναι διαφορετική από την ήδη υπάρχουσα καμπύλη που έχει το διάγραμμα. Εμείς για να μην έχουμε σφάλματα στα δεδομένα μετρήσεων μας, επιθυμούμε η τεθλασμένη γραμμή να ταυτιστεί με την καμπύλη. Με επιλογή του κουμπιού, διηλεκτρικό φορτίο (Dielectric Load), η τεθλασμένη γραμμή εφαρμόζει στην καμπύλη οπότε κάναμε σωστά τη βαθμονόμηση Liquid-Load Circuit. Αφαιρούμε τον ανιχνευτή από το απιονισμένο νερό, τον καθαρίζουμε από τις σταγόνες νερού που έχουν επικαθίσει πάνω του και ασχολούμαστε με το τελευταίο στάδιο της βαθμονόμησης.



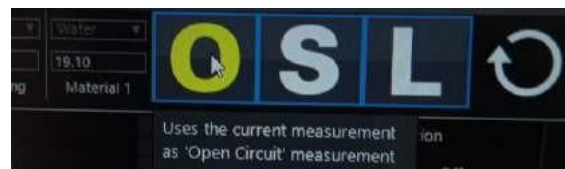
Εικόνα 59: Βαθμονόμηση Liquid-Load Circuit

### Open Circuit Calibration

Τέλος, ο ομοαξονικός ανιχνευτής περιβάλλεται από τα στρώματα του ατμοσφαιρικού αέρα και στην εφαρμογή βλέπουμε μια τεθλασμένη γραμμή που είναι αναγκαίο να συμπίπτει με τον κάθετο άξονα για να πραγματοποιηθεί η βαθμονόμηση. Με επιλογή του κουμπιού, Open Circuit, η τεθλασμένη γραμμή συμφωνεί με τον κάθετο άξονα και έτσι τερματίζεται με επιτυχία ολόκληρη η διεργασία της βαθμονόμησης.



Εικόνα 60: Ελεύθερος ομοαξονικός ανιχνευτής



Εικόνα 61: Βαθμονόμηση Open Circuit



### Πειραματική μέτρηση διηλεκτρικής σταθεράς $\epsilon_r'$

Με την ολοκλήρωση της βαθμονόμησης του μετρητικού συστήματος, είμαστε σε θέση να εκθέσουμε τα δοκίμια μας στην επιφάνεια του ομοαξονικού ανιχνευτή και να λάβουμε τα πειραματικά δεδομένα μας για τη διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r'$ .

Στο περιβάλλον του υπολογιστή, πηγαίνουμε στην κατηγορία των μετρήσεων και ξεκινάμε τη σάρωση του ανιχνευτή.



Εικόνα 62: Σάρωση ανιχνευτή

Αρχικά, επειδή δεν έχουμε τοποθετήσει το εξεταζόμενο υλικό στην επιφάνεια του ανιχνευτή, ο τελευταίος μετράει τις ηλεκτρικές ιδιότητες του αέρα όπως βλέπουμε στην εικόνα.



Εικόνα 63: Μέτρηση ηλεκτρικών χαρακτηριστικών αέρα

Ξεκινάμε την επεξήγηση της παραπάνω εικόνας από πάνω προς τα κάτω και από αριστερά προς δεξιά. Πρώτα, βλέπουμε τις επιλογές των φακών που μας δίνουν τη δυνατότητα να εστιάσουμε στο διάγραμμα με λεπτομέρεια στην περιοχή που μας ενδιαφέρει. Μετά, έχουμε την ικανότητα να διαλέξουμε τα μεγέθη που θέλουμε να μελετήσουμε στο υλικό προς εξέταση. Οι πιθανές επιλογές είναι το πραγματικό μέρος της ηλεκτρικής επιτρεπτότητα ( $\epsilon'$ ), το φανταστικό μέρος της ηλεκτρικής επιτρεπτότητα ( $\epsilon''$ ), την αγωγιμότητα ( $\sigma$ ) και τη γωνία απωλειών ( $\delta$ ). Τέλος, δεξιά έχουμε ένα κουτάκι, όπου εκεί αναγράφονται με ακρίβεια οι αριθμητικές τιμές που μελετάμε τη δεδομένη στιγμή.

Όλα τα μεγέθη προς έρευνα παρουσιάζονται στον κάθετο άξονα και μπορούμε να ασχολούμαστε με παραπάνω από 1 κάθε φορά, όπως φαίνεται στην εικόνα. Στον οριζόντιο άξονα, έχουμε πάντα τη συχνότητα  $f$ , όπου έχουμε ορίσει το εύρος της να είναι από 500 – 3.000 MHz (Ultra High Frequency).

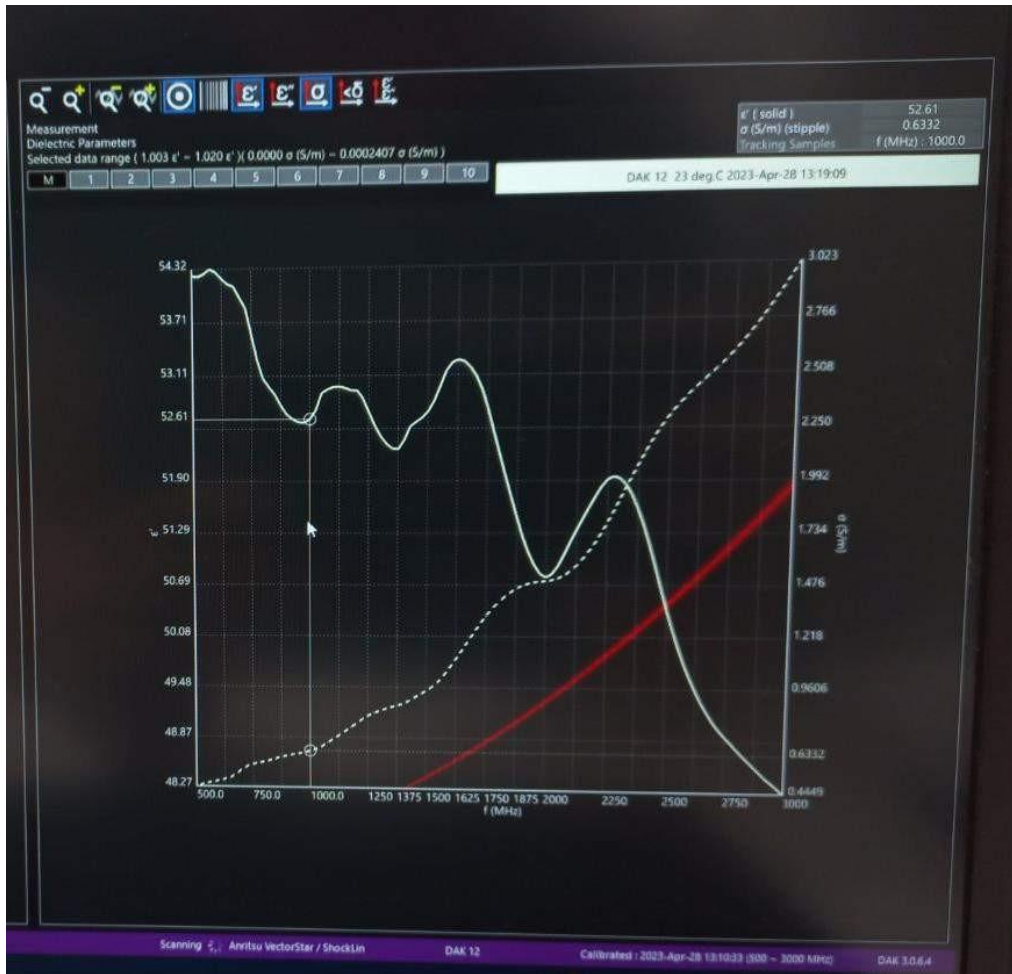
Στο διάγραμμα, με λευκή έντονη γραμμή έχουμε τη διακύμανση της διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon'$ , ενώ με λευκή διακεκομμένη γραμμή έχουμε την αγωγιμότητα  $\sigma$ . Παρατηρούμε, ότι η τιμή του  $\epsilon'$  είναι κοντά στο 1 και η τιμή της αγωγιμότητας του  $\sigma$  πρακτικά 0. Γνωρίζουμε ότι ο αέρας θεωρείται ως μονωτικό υλικό και ότι έχει  $\epsilon'$  ελάχιστα μεγαλύτερο του 1, οπότε δεν είναι περίεργες αυτές οι τιμές.

Σε αυτό το σημείο, βάζουμε το δοκίμιο μας στο μπλοκ υποστήριξης και φέρνουμε σιγά σιγά τον ανιχνευτή σε επαφή με το εξεταζόμενο υλικό. Αυτή η διαδικασία είναι πολύ σημαντική καθώς δεν πρέπει να εγκλωβιστεί αέρας ανάμεσα σε αυτά τα 2. Όλη η επιφάνεια του ανιχνευτή, είναι αναγκαίο να βρίσκεται σε επαφή με εξεταζόμενο υλικό για να λάβουμε την καλύτερη δυνατή μέτρηση. Μερικές φορές, δεν θα τα καταφέρουμε με την 1<sup>η</sup> προσπάθεια, οπότε δοκιμάζουμε ξανά μέχρι να υπάρχει απόλυτη επαφή και εξετάζουμε από όλες τις οπτικές γωνίες.



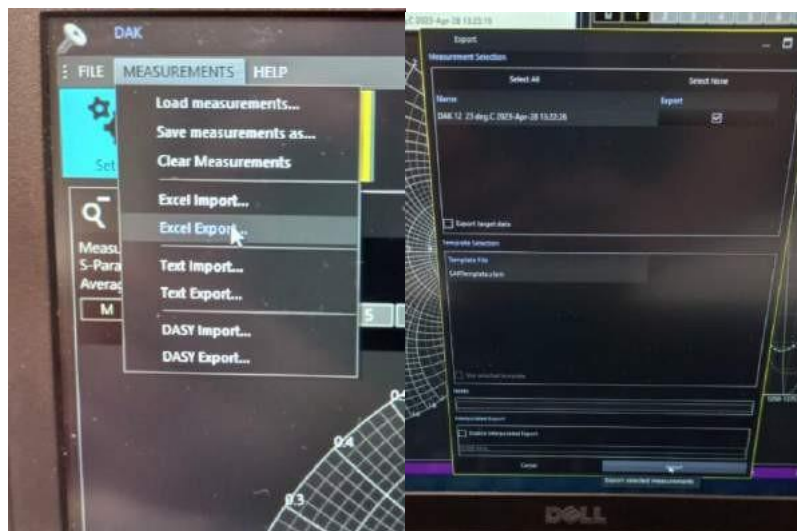
Εικόνα 64: Μπροστινή και οπίσθια όψη εξεταζόμενου υλικού

Επειδή, τα παραγόμενα καλούπια μπορεί να μην είναι εντελώς κυλινδρικά, χρειάζεται να φέρουμε σε ελαφριά κλίση τον ανιχνευτή για να υπάρχει επαφή μόνο με το υλικό. Αυτό είναι αποτέλεσμα από τη μη ομοιόμορφη έγχυση του ζεστού μείγματος στο καλούπι κατά την πειραματική διαδικασία. Ωστόσο, δεν αποτελεί κάποιο πρόβλημα για την τελική μέτρηση της διηλεκτρικής σταθεράς που θα λάβουμε. Επίσης, προσπαθούμε το κέντρο του ανιχνευτή και του υλικού να ταυτίζονται. Ύστερα από αυτά, βλέπουμε την μετρούμενη τιμή στον υπολογιστή.



Εικόνα 65: Μέτρηση  $\epsilon'$  του εξεταζόμενου υλικού

Η κόκκινη γραμμή είναι η διηλεκτρική σταθερά του απιονισμένου νερού που πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση. Διακρίνουμε ότι για συχνότητα  $f = 1.000$  MHz, έχουμε τιμή διηλεκτρικής σταθεράς υλικού ίση με  $\epsilon' = 52,6$ . Μετά, εξάγουμε τα δεδομένα μας σε ένα αρχείο Excel, όπου το ονομάζουμε κατάλληλα για να θυμόμαστε ποιο δοκίμιο εξετάσαμε. Τελικά, μεταφέρουμε τα αρχεία από τον υπολογιστή σε εξωτερικό USB, για να μπορέσουμε να τα επεξεργαστούμε περαιτέρω.



Εικόνα 66: Εξαγωγή δεδομένων  $\epsilon'$  του εξεταζόμενου υλικού

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Ανάλυση Αποτελεσμάτων & Συμπεράσματα

### 5.1 Εισαγωγή

Η ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων που ακολουθεί είναι ένα κρίσιμο βήμα στην επιστημονική μας έρευνα που θα μας επιτρέψει να παρουσιάσουμε ουσιαστικά συμπεράσματα, καθώς παράλληλα θα μπορέσουμε να προτείνουμε βελτιώσεις που πραγματοποιήσαμε και να αναφέρουμε τους περιορισμούς που αντιμετωπίσαμε. Παρακάτω, επεξεργαζόμαστε τα δεδομένα που συλλέξαμε από το μετρητικό σύστημα (VNA & probe), τα αναδύουμε σε μορφή πινάκων και διαγραμμάτων και τα σχολιάζουμε, με σκοπό να είναι όσο περισσότερο ευνόητα γίνεται στον αναγνώστη. Μελετάμε τη συσχέτιση των δεδομένων μας και εξάγουμε σχέσεις που παρέχουν πληροφορίες για τη διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon'$  του παραγόμενου σύνθετου υλικού. Τέλος, θέτουμε στο καινούργιο πρωτόκολλο που αναπτύξαμε το πρόβλημα να δημιουργήσει 2 ανεξάρτητα υλικά με συγκεκριμένες τιμές  $\epsilon_r'$ . Από τα μαθηματικά μοντέλα, καταλήγουμε στη θεωρητικά απαιτούμενη αναλογία απιονισμένου νερού – σιλικόνης και μετράμε να δούμε αν το τελικό υλικό έχει την τιμή που επιθυμούσαμε.

### 5.2 Αποτελέσματα Αρχικού Πρωτόκολλου

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, εξετάζουμε δοκίμια με μέγιστη αναλογία απιονισμένου νερού – σιλικόνης 6:1. Δημιουργούμε 4 κύρια μείγματα, τα οποία τα δημιουργούμε 3 φορές για λόγους επαναληψιμότητας δηλαδή έχουμε 3 σειρές δοκιμίων.

**Ορίζουμε ότι όλες οι μετρήσεις διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r'$  των δοκιμίων πραγματοποιούνται στην κάτω επιφάνεια τους και για τιμή συχνότητας 1 GHz. Η 1<sup>η</sup> μέτρηση μπορεί να ληφθεί μέχρι και 72 ώρες μετά την μέρα κατασκευής. Παράλληλα, τα δοκίμια συντηρούνται στο ψυγείο και περίπου κάθε εβδομάδα μελετάμε την κατάσταση των δοκιμίων για να δούμε ποια είναι η διάρκεια ζωής τους. Οι καμπύλες συνοδεύονται από γραμμές σφάλματος τιμής 1 τυπικής απόκλισης.**

#### 1<sup>η</sup> Σειρά Δοκιμίων

Ξεκινάμε τη δημιουργία της 1<sup>η</sup> σειράς δοκιμίων στις 28/03/2023, μετράμε την επόμενη μέρα τη σχετική διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon'$  των δοκιμίων και έχουμε τα ακόλουθα.

1 <sup>η</sup> Σειρά Δοκιμίων				
α/α	Απιονισμένο Νερό (g)	Ζελατίνη (g)	Σιλικόνη (g)	Καταλύτης (g)
Μείγμα 1	15,1	5,1	10,1	0,5
Μείγμα 2	30,0	10,1	10,2	0,3
Μείγμα 3	45,1	14,9	9,9	0,5
Μείγμα 4	60,1	20,1	9,9	0,5

Πίνακας 10: 1<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων αρχικού πρωτόκολλου

Παράλληλα, δημιουργούμε έναν άλλο πίνακα με τις αναλογίες νερού – σιλικόνης, νερού – ζελατίνης, σκληρυντή – σιλικόνης και της τιμής της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς που μετρήσαμε για το συγκεκριμένο δοκίμιο. Αναφέρουμε ότι δεν μας ενδιαφέρουν οι απόλυτες μάζες, όσο μας ενδιαφέρει ο λόγος τους. Υπενθυμίζουμε ότι ο λόγος νερού – ζελατίνης επιθυμούμε να είναι σταθερός και ίσος με 3 για κατασκευαστικούς λόγους (πήξη του μείγματος) και ο λόγος καταλύτη – σιλικόνης 3-5 % καθώς έτσι ορίζει ο κατασκευαστής.

1 <sup>η</sup> Σειρά Δοκιμίων – Αναλογίες Υλικών & $\epsilon_r'$				
Μετρούμενη Συχνότητα Διηλεκτρικής Σταθεράς $f = 1 \text{ GHz}$				
α/α	Λόγος Νερό-Ζελατίνη	Λόγος Νερό-Σιλικόνη	Λόγος Καταλύτη-Σιλικόνης (%)	$\epsilon_r'$
Μείγμα 1	3,0	1,5	5%	27,1
Μείγμα 2	3,0	2,9	3%	34,9
Μείγμα 3	3,0	4,6	5%	30,6
Μείγμα 4	3,0	6,1	5%	42,5

Πίνακας 11: Σημαντικές αναλογίες και διηλεκτρική σταθερά 1<sup>ης</sup> σειράς μετρήσεων.

Γενικά, περιμένουμε ότι με αύξηση του λόγου νερού – σιλικόνης θα έχουμε αντίστοιχα μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά του σύνθετου υλικού. Η διηλεκτρική σταθερά του απιονισμένου νερού μετρήθηκε  $\epsilon_r', \text{DI WATER} = 78,9$ , ενώ αυτή της σιλικόνης  $\epsilon_r', \text{SILICONE RUBBER} = 3,5$ . Άρα, με αύξηση απιονισμένου νερού στο διάλυμα περιμένουμε αύξηση στο  $\epsilon_r'$ , κάτι το οποίο δεν προκύπτει για το μείγμα 3 συγκρίνοντας την τιμή του με αυτή του μείγματος 2. Παρακάτω, εισάγουμε εικόνα από την 1<sup>η</sup> σειρά δοκιμίων.



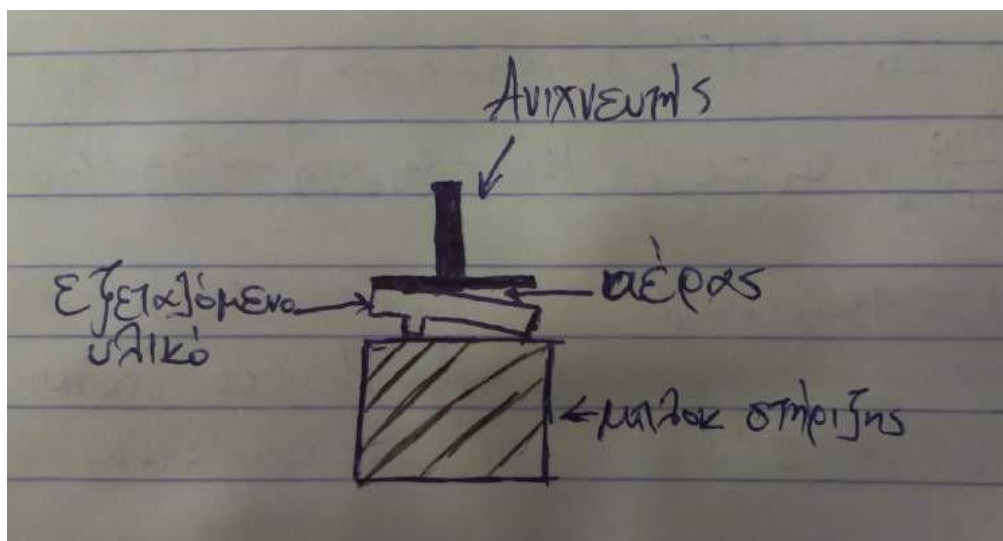
Εικόνα 67: 1<sup>η</sup> σειρά δοκιμίων αρχικού πρωτόκολλου

Οι παρατηρήσεις και εξηγήσεις μας, για τη 1<sup>η</sup> σειρά δοκιμίων συνοψίζονται παρακάτω :

- ✚ Τα μείγματα 1,2 & 3 (15, 30, 45 g απιονισμένο H<sub>2</sub>O) είναι ομοιογενή δηλαδή είχαμε καλή ανάμειξη υλικών. Αντιθέτως, το μείγμα 4 (60 g απιονισμένο H<sub>2</sub>O) δεν ομογενοποιήθηκε. Το καλύτερο εμφανισιακά είναι το μείγμα 2.
- ✚ Όταν κάναμε την έγχυση του σύνθετου υλικού στα κυκλικά καλούπια, τοποθετήσαμε αμέσως τα καπάκια από πάνω για προστασία. Επειδή, το υλικό βρίσκεται σε θερμοκρασία 75°C μεταφέρεται θερμότητα προς το περιβάλλον και εγκλωβίζεται ένα «νέφος» υδρατμών μέσα στο καλούπι. Αυτός ο ατμός συμπυκνώνεται με τη ψύξη του υλικού και για αυτό έχουμε σταγόνες νερού πάνω στα προστατευτικά καπάκια. Επομένως, πρέπει να καθαρίζουμε τα δοκίμια από τις σταγόνες νερού με χαρτί κουζίνας, για να μη λάβουμε αυξημένη τιμή  $\epsilon_r'$ .
- ✚ Σε όλα τα δοκίμια, παρουσιάζονται φυσαλίδες στην πάνω επιφάνεια. Ωστόσο, εμάς μας ενδιαφέρει η κάτω επιφάνεια οπότε δεν μας απασχολεί ιδιαίτερα σχετικά με την μετρούμενη τιμή  $\epsilon'$ .
- ✚ Το μείγμα 3, δεν είναι επίπεδο καθώς στην πάνω επιφάνεια παρουσιάζεται εξόγκωμα & έχει μικρότερη διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon'$  από το μείγμα 2.

Εξήγηση 1<sup>ης</sup> παρατήρησης: Επειδή, το αρχικό πρωτόκολλο είχε ως μέγιστο όριο την αναλογία 3:1 νερού – σιλικόνης, οι χρόνοι μίξης και οι θερμοκρασίες δεν είναι αρκετές για να λιώσουν τα υλικά του μείγματος 4 (αναλογία 6:1). Αναλυτικά, αναφέρουμε ότι στο βήμα 7 του πειράματος, το μείγμα 4 έχει ακόμα κρυσταλλική μορφή και αντίστοιχα το μείγμα 3 δεν έχει λιώσει πλήρως.

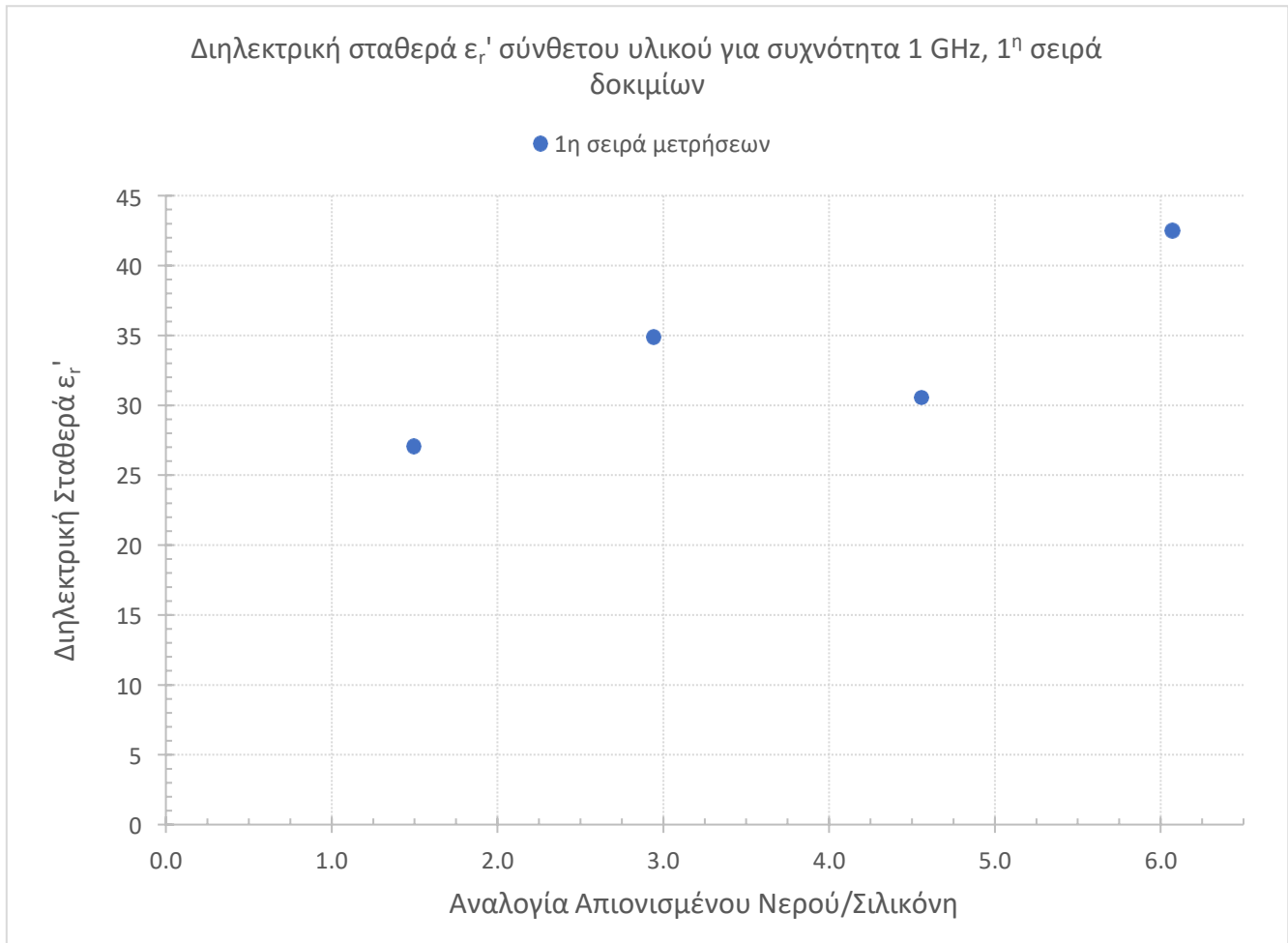
Εξήγηση 3<sup>ης</sup> παρατήρησης: Για το συγκεκριμένο δοκίμιο κάναμε παραπάνω έγχυση υλικού στο καλούπι, με αποτέλεσμα όταν πήγαμε να τοποθετήσουμε το καπάκι και να σφραγίσουμε, μικρή ποσότητα από το δοκίμιο ακούμπησε το καπάκι και κατά τη ψύξη του έλαβε το συγκεκριμένο σχήμα. Όταν ήρθε η ώρα της μέτρησης, υπήρχε αέρας ανάμεσα από το εξεταζόμενο υλικό και τον ανιχνευτή λόγω της μορφής του. Επομένως, δεν μετρούσε μόνο τη σχετική διηλεκτρική σταθερά του υλικού αλλά και αυτή του αέρα. Ο αέρας με τη χαμηλή του διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_{r, \text{AIR}} \cong 1$ , μείωσε τη συνολική μετρούμενη τιμή που λάβαμε. Κάνουμε ένα υπερβολικό σκίτσο, για περαιτέρω κατανόηση.



Εικόνα 68: «Υπερβολικό» σκίτσο για τη μέτρηση 3<sup>ου</sup> μείγματος της 1<sup>ης</sup> σειράς δοκιμίων αρχικού πρωτόκολλου

Ήδη βλέπουμε ότι έχουμε χαμηλότερη τιμή  $\epsilon_r$  από αυτή που περιμέναμε για το μείγμα 3, λόγω απώλειας επαφής μεταξύ του σύνθετου υλικού και του ανιχνευτή. Ωστόσο, εμείς δεχόμαστε τις τιμές ως έχουν και στο τέλος θα καταλήξουμε σε συμπεράσματα. Επίσης, αυτή ήταν η 1<sup>η</sup> απόπειρα μας να ακολουθήσουμε το αρχικό πρωτόκολλο και να δημιουργήσουμε μόνοι μας, τα δοκίμια.

Τελικά, με βάση τα δεδομένα μας έχουμε το ακόλουθο διάγραμμα.



Διάγραμμα 1: Διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r'$  δοκιμίων 1<sup>η</sup> σειράς δοκιμίων αρχικού πρωτόκολλου

Παρατηρούμε, ότι με αύξηση αναλογίας νερού - σιλικόνης έχουμε αύξηση στη διηλεκτρική σταθερά του υλικού, με εξαίρεση το 3<sup>ο</sup> σημείο. Ωστόσο, προηγουμένως εξηγήσαμε γιατί είναι μειωμένη η τιμή του. Γενικά, οι τιμές μας για τη διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r'$  κυμαίνονται στο διάστημα 27 – 42.

Αυτή είναι η βασική διαδικασία που επιτελούμε και μαζί με τα αποτελέσματα των άλλων 2 σειρών μετρήσεων, στοχεύουμε να καταλήξουμε σε ένα μαθηματικό μοντέλο μεταξύ του  $\epsilon_r'$  του σύνθετου υλικού και της αναλογίας απιονισμένου νερού – σιλικόνης.

### 2<sup>η</sup> Σειρά Δοκιμίων

Δημιουργία 2<sup>η</sup> σειράς δοκιμίων στις 29/03/2023 και μετράμε στις 31/03/2023 τη σχετική διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r'$  των δοκιμίων.

2 <sup>η</sup> Σειρά Δοκιμίων				
α/α	Απιονισμένο Νερό (g)	Ζελατίνη (g)	Σιλικόνη (g)	Καταλύτης (g)
Μείγμα 1	14,9	5,0	10,0	0,5
Μείγμα 2	30,0	10,0	10,0	0,5
Μείγμα 3	45,0	15,1	10,6	0,5
Μείγμα 4	60,1	19,9	10,1	0,5

Πίνακας 12: 2<sup>η</sup> σειρά δοκιμίων αρχικού πρωτόκολλου

Παρακάτω, ο πίνακας αναλογιών.

2 <sup>η</sup> Σειρά Δοκιμίων – Αναλογίες Υλικών & $\epsilon_r'$				
Μετρούμενη Συχνότητα Διηλεκτρικής Σταθεράς $f = 1 \text{ GHz}$				
α/α	Λόγος Νερό-Ζελατίνη	Λόγος Νερό-Σιλικόνη	Λόγος Καταλύτη-Σιλικόνης (%)	$\epsilon_r'$
Μείγμα 1	3,0	1,5	5%	16,7
Μείγμα 2	3,0	3,0	5%	37,6
Μείγμα 3	3,0	4,2	5%	38,5
Μείγμα 4	3,0	6,0	5%	41,0

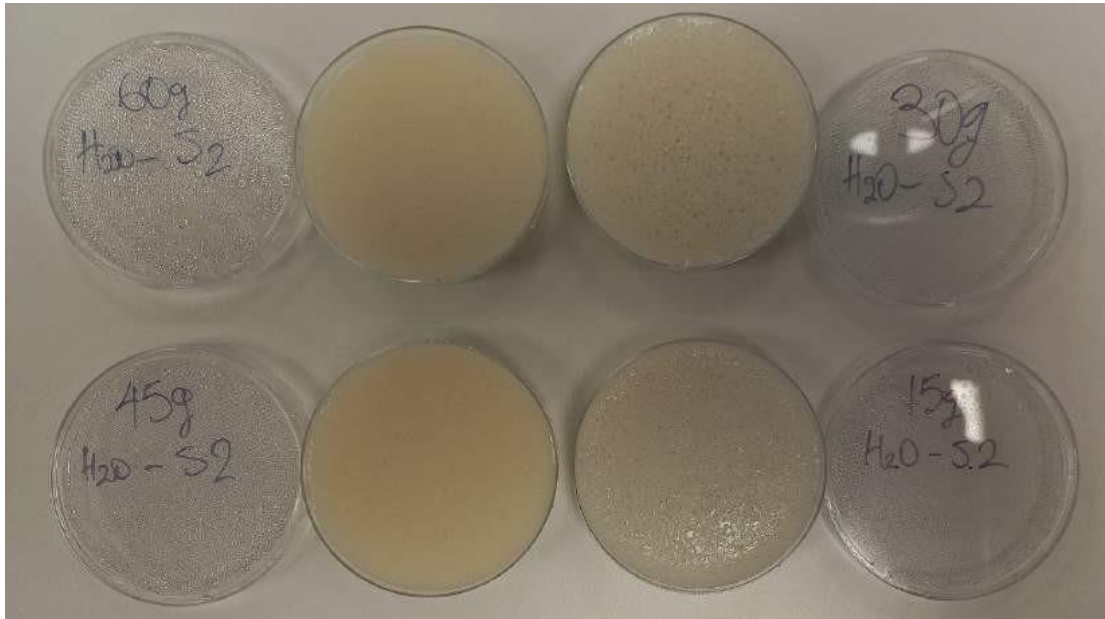
Πίνακας 13: Αναλογίες και διηλεκτρική σταθερά 2<sup>ης</sup> σειράς δοκιμίων αρχικού πρωτόκολλου

Οι παρατηρήσεις μας, για τη 2<sup>η</sup> σειρά δοκιμίων:

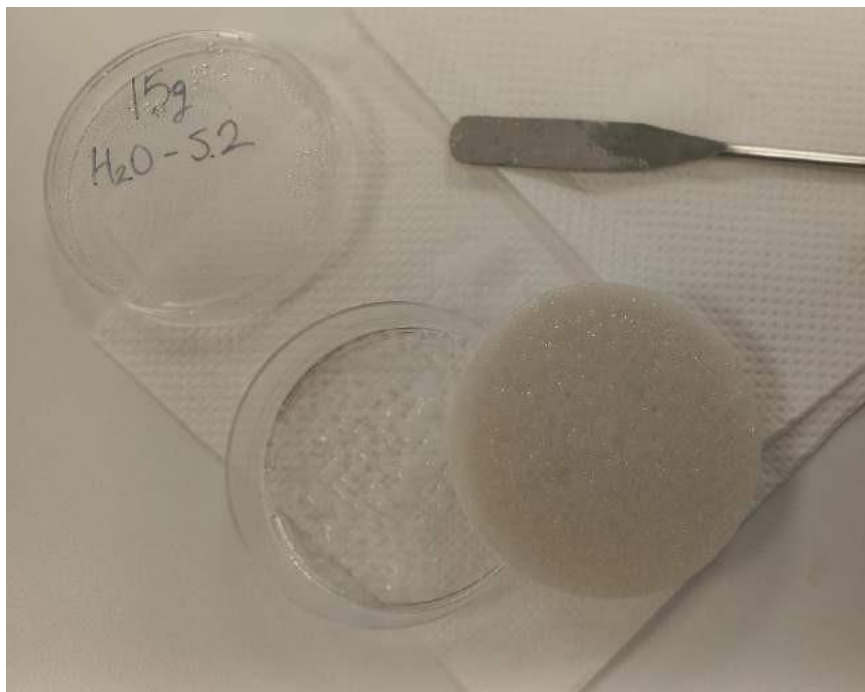
- ✚ Γενικά, το καλύτερο δοκίμιο από άποψη φυσαλίδων είναι το μείγμα 3. Τα μείγματα 1 & 2 παρουσιάζουν αρκετές φυσαλίδες και το μείγμα 4 είναι καλύτερο εμφανισιακά από αυτό της 1<sup>ης</sup> σειράς.
- ✚ Το σύνθετο υλικό του μείγματος 1 έχει πολύ μικρότερη διηλεκτρική σταθερά σε σύγκριση με το αντίστοιχο της 1<sup>ης</sup> σειράς ( $\epsilon_r'$ , 15G Sample 2 = 16,7 ενώ  $\epsilon_r'$ , 15G Sample 1 = 27,1). Το συγκεκριμένο δοκίμιο δεν ήταν ομογενοποιημένο καθώς στο κάτω μέρος του υπάρχει σιλικόνη που το κάνει κολλώδες και του μειώνει το  $\epsilon'$ .
- ✚ Για το μείγμα 2, έχουμε καλή μέτρηση αν και έχει λίγη σιλικόνη στο κάτω μέρος.
- ✚ Για το μείγμα 3, βλέπουμε μία λογική μέτρηση καθώς είναι μεγαλύτερη από αυτή του μείγματος 2 (συγκριτικά με την 1<sup>η</sup> σειρά δοκιμίων, που δεν



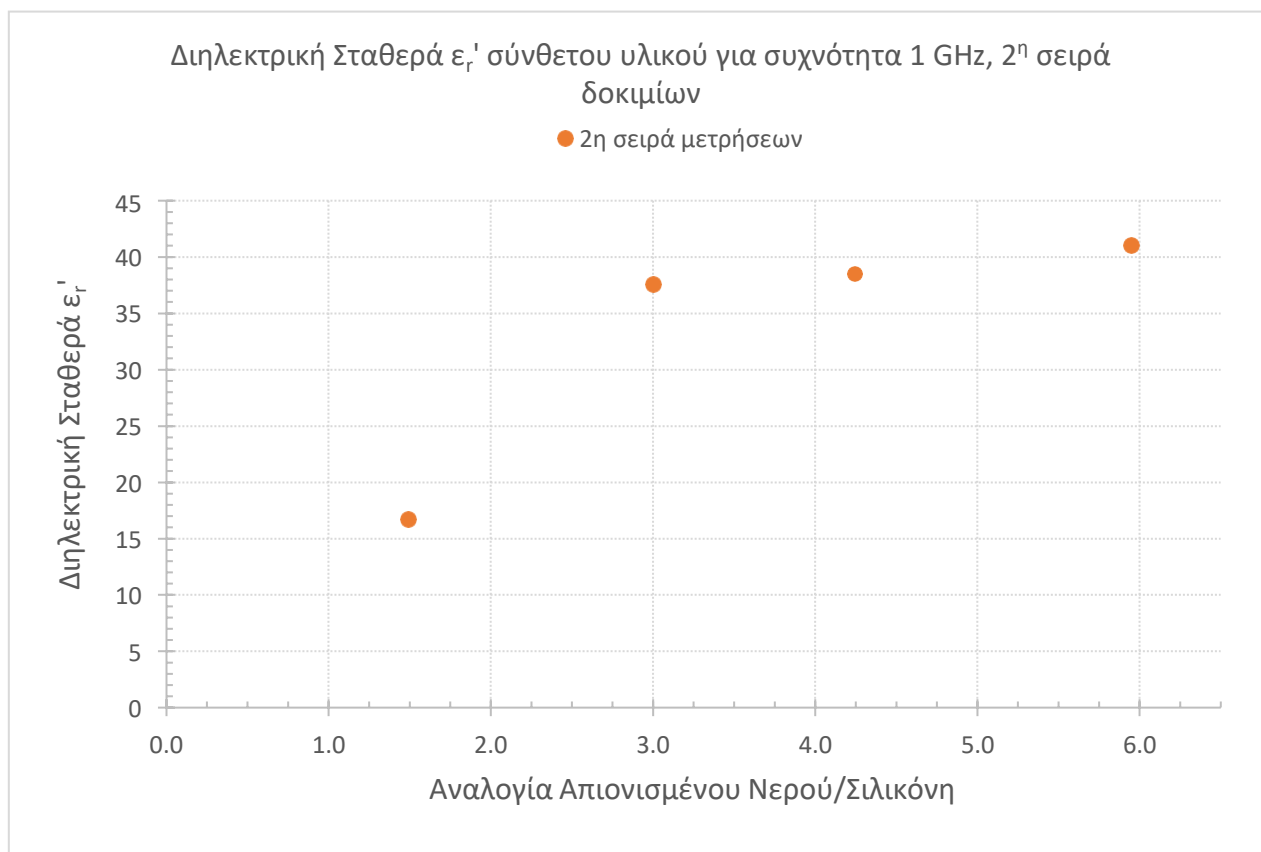
ίσχυε αυτό). Το δοκίμιο είναι λίγο κομμένο στην άκρη αλλά δεν μας επηρεάζει στη μέτρηση.



Εικόνα 69: Εμφάνιση 2<sup>ης</sup> σειράς δοκιμίων αρχικού πρωτόκολλου



Εικόνα 70: Μείγμα 1 της 2<sup>ης</sup> σειράς δοκιμίων του αρχικού πρωτόκολλου  
Εδώ, βλέπουμε καθαρά τη σιλικόνη στο κάτω μέρος του δοκιμίου. Εξού και η μειωμένη τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς του  $\epsilon_r$ '.



Διάγραμμα 2: Διηλεκτρική σταθερά δοκιμών  $\epsilon_r'$  2<sup>η</sup> σειράς δοκιμών

Αντιλαμβανόμαστε, ότι έχουμε μειωμένη τιμή (από αυτή που περιμέναμε με βάση την 1<sup>η</sup> σειρά δοκιμών) του  $\epsilon_r'$  για το 1<sup>ο</sup> σημείο (μείγμα 1) λόγω της κολλημένης σιλικόνης στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου. Επίσης, τα σημεία 2,3 & 4 (μείγματα 2,3 & 4), έχουν παραπλήσιες τιμές διηλεκτρικής σταθεράς παρόλο της αύξησης της αναλογίας. Φαίνεται σαν να φτάνει ένα μέγιστο όριο (πάνω «ταβάνι»), καθώς η αύξηση του νερού δεν επιφέρει σημαντική αύξηση στην τιμή  $\epsilon_r'$  του σύνθετου υλικού.

### 3<sup>η</sup> Σειρά Δοκιμών

Δημιουργία 3<sup>η</sup> σειράς δοκιμών στις 31/03/2023 και μετράμε στις 03/04/2023 τη διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r'$  των δοκιμών.

3 <sup>η</sup> Σειρά Δοκιμών				
α/α	Απιονισμένο Νερό (g)	Ζελατίνη (g)	Σιλικόνη (g)	Καταλύτης (g)
Μείγμα 1	15,1	4,9	10,1	0,4
Μείγμα 2	29,9	10,0	10,1	0,5
Μείγμα 3	45,0	15,2	10,1	0,5
Μείγμα 4	60,1	20,0	10,2	0,5

Πίνακας 14: 3<sup>η</sup> σειρά δοκιμών αρχικού πρωτόκολλου

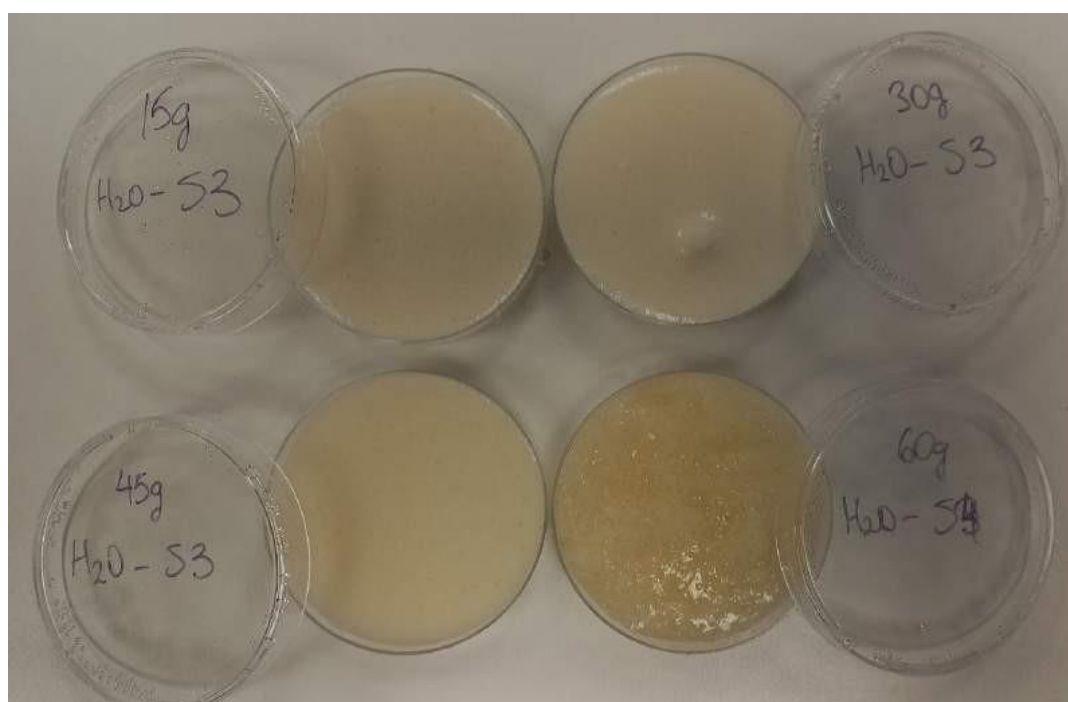
Παρακάτω, ο πίνακας αναλογιών.

3 <sup>η</sup> Σειρά Δοκιμίων – Αναλογίες Υλικών & $\epsilon_r'$				
Μετρούμενη Συχνότητα Διηλεκτρικής Σταθεράς $f = 1 \text{ GHz}$				
α/α	Λόγος Νερό-Ζελατίνη	Λόγος Νερό-Σιλικόνη	Λόγος Καταλύτη-Σιλικόνης (%)	$\epsilon_r'$
Μείγμα 1	3,1	1,5	4%	23,6
Μείγμα 2	3,0	3,0	5%	28,2
Μείγμα 3	3,0	4,5	5%	42,7
Μείγμα 4	3,0	5,9	5%	47,6

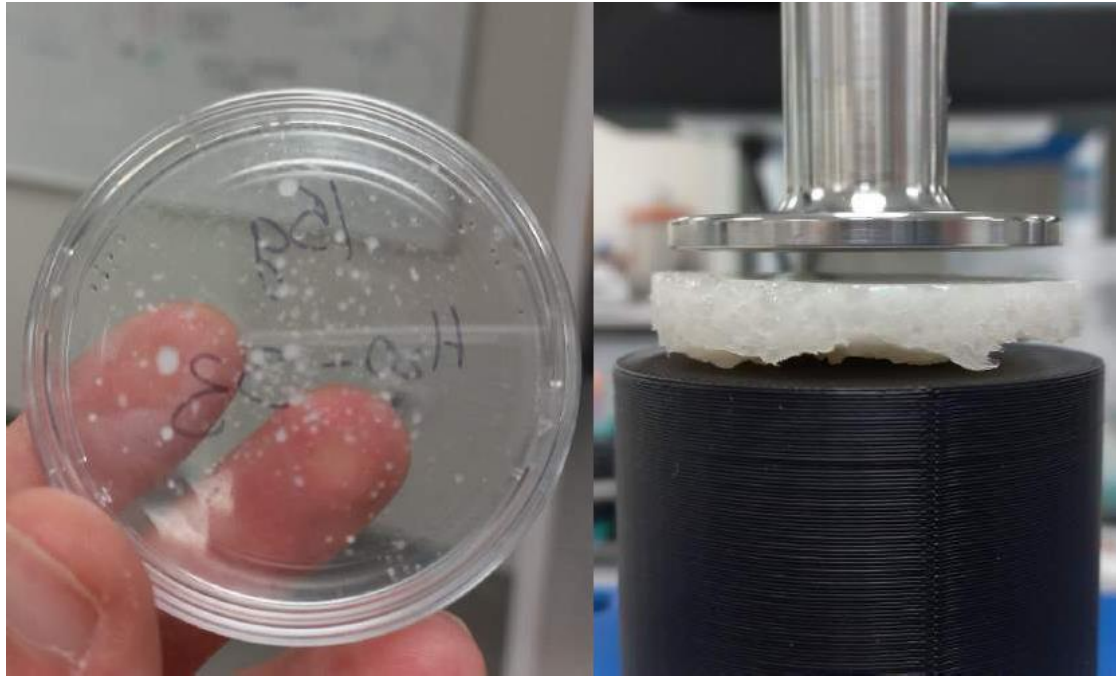
Πίνακας 15: Αναλογίες και διηλεκτρική σταθερά 3<sup>ης</sup> σειράς δοκιμίων αρχικού πρωτόκολλου

Οι παρατηρήσεις μας, για τη 3<sup>η</sup> σειρά δοκιμίων:

- ✚ Το μείγμα 1 είναι αρκετά καλό δοκίμιο αλλά έχει σταγόνες σιλικόνης στην κάτω επιφάνεια.
- ✚ Το μείγμα 2 παρουσιάζει προεξοχή και έχει σχετικά καθαρό κάτω μέρος.
- ✚ Το μείγμα 3 είναι μακράν το καλύτερο δοκίμιο που έχουμε φτιάξει συνολικά. Δεν κολλάει καθόλου, έχει καθαρή κάτω επιφάνεια.
- ✚ Το μείγμα 4 δεν κατάφερε να λιώσει εντελώς κατά την πειραματική διαδικασία, έχει περίεργη μορφή ωστόσο έχει καθαρή κάτω επιφάνεια.

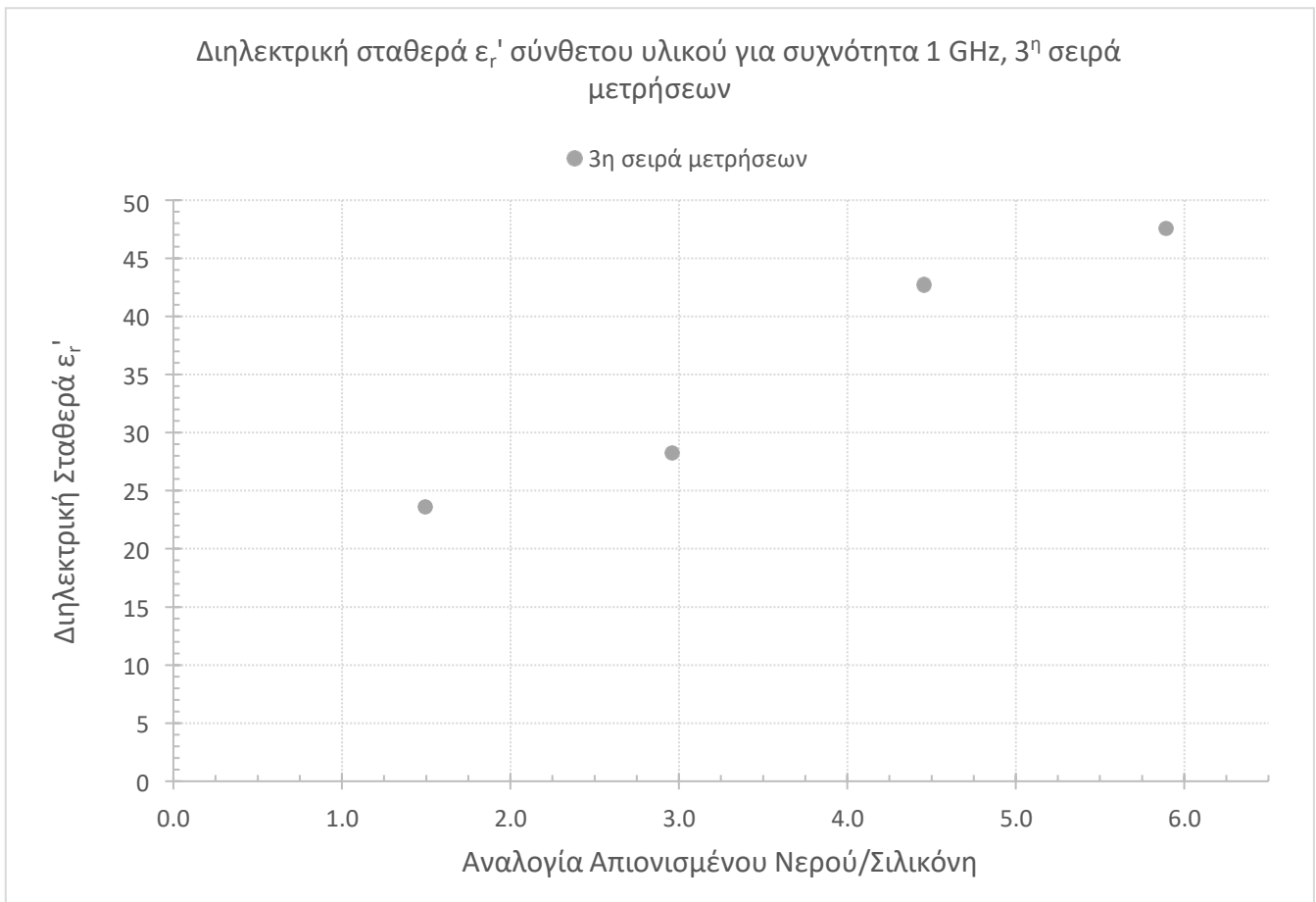


Εικόνα 71: 3<sup>η</sup> σειρά δοκιμίων καλούπια αρχικού πρωτόκολλου



Εικόνα 72: Σταγόνες σιλκόνης στο καλούπι του μείγματος 1 & μορφή του μείγματος 4.

Παρακάτω, το διάγραμμα με τις τιμές διηλεκτρικής σταθεράς, για την 3<sup>η</sup> σειρά.



Το μόνο διάγραμμα που βλέπουμε ότι η αύξηση της αναλογίας νερού – σιλικόνης επιφέρει αύξηση σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς. Όσο μεγαλώνει ο λόγος νερού – σιλικόνης, βλέπουμε ότι επιδρά λιγότερο στην αύξηση του μεγέθους  $\epsilon_r'$ .

Έχοντας κατασκευάσει τις 3 σειρές δοκιμών, οργανώνουμε τα αποτελέσματά μας σε μορφή πινάκων και δημιουργούμε αντίστοιχα διαγράμματα.

A/A	Αρχικό Πρωτόκολλο		
	1 <sup>η</sup> Σειρά Δοκιμών	2 <sup>η</sup> Σειρά Δοκιμών	3 <sup>η</sup> Σειρά Δοκιμών
	$\epsilon_r'$	$\epsilon_r'$	$\epsilon_r'$
Μείγμα 1	27,1	16,7	23,6
Μείγμα 2	34,9	37,6	28,2
Μείγμα 3	30,6	38,5	42,7
Μείγμα 4	42,5	41,0	47,6

Πίνακας 16: Διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r'$  για όλες τις σειρές δοκιμών του αρχικού πρωτόκολλου

Παραδόξως, παρατηρούμε ότι τη μεγαλύτερη συνέπεια ως προς την επαναληψιμότητα των τιμών του  $\epsilon_r'$ , παρουσιάζει το μείγμα 4 που δυσκολευόμασταν να κατασκευάσουμε λόγω των θερμοκρασιών και των χρόνων αναμίξεως. Όλα τα υπόλοιπα μείγματα έχουν σημαντικές αριθμητικές διαφορές μεταξύ τους. Αυτές προέκυψαν από μη ιδανική ανάμιξη κατά την πειραματική διαδικασία και πιθανώς από όχι τόσο καλή μέτρηση μερικές φορές λόγω του σχήματος του σύνθετου υλικού.

Για κάθε μείγμα, υπολογίζουμε 3 στατιστικά μεγέθη για να μπορέσουμε να σχολιάσουμε καλύτερα τα αποτελέσματά τη μέση τιμή  $\epsilon'_{\text{ΜΕΣΗ}}$ , την τυπική απόκλιση  $\sigma$  και το συντελεστή διακύμανσης CV. Έχουμε ότι :

A/A	1,5:1 ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ/ΣΙΛΙΚΟΝΗ - ΜΕΙΓΜΑ 1			
	$\epsilon_r'$	$\epsilon'_{\text{ΜΕΣΗ}}$	Τυπική απόκλιση $\sigma$	Συντελεστής διακύμανσης CV (%)
1η Σειρά Δοκιμών	27,1	22,5	4,3	19,2
2η Σειρά Δοκιμών	16,7			
3η Σειρά Δοκιμών	23,6			

Πίνακας 17: Στατιστικά μεγέθη μείγματος 1 αρχικού πρωτόκολλου

A/A	3:1 ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ/ΣΙΛΙΚΟΝΗ - ΜΕΙΓΜΑ 2			
	$\epsilon_r'$	$\epsilon'_{\text{ΜΕΣΗ}}$	Τυπική απόκλιση $\sigma$	Συντελεστής διακύμανσης CV (%)
1η Σειρά Δοκιμών	34,9	33,6	3,9	11,7
2η Σειρά Δοκιμών	37,6			
3η Σειρά Δοκιμών	28,2			

Πίνακας 18: Στατιστικά μεγέθη μείγματος 2 αρχικού πρωτόκολλου

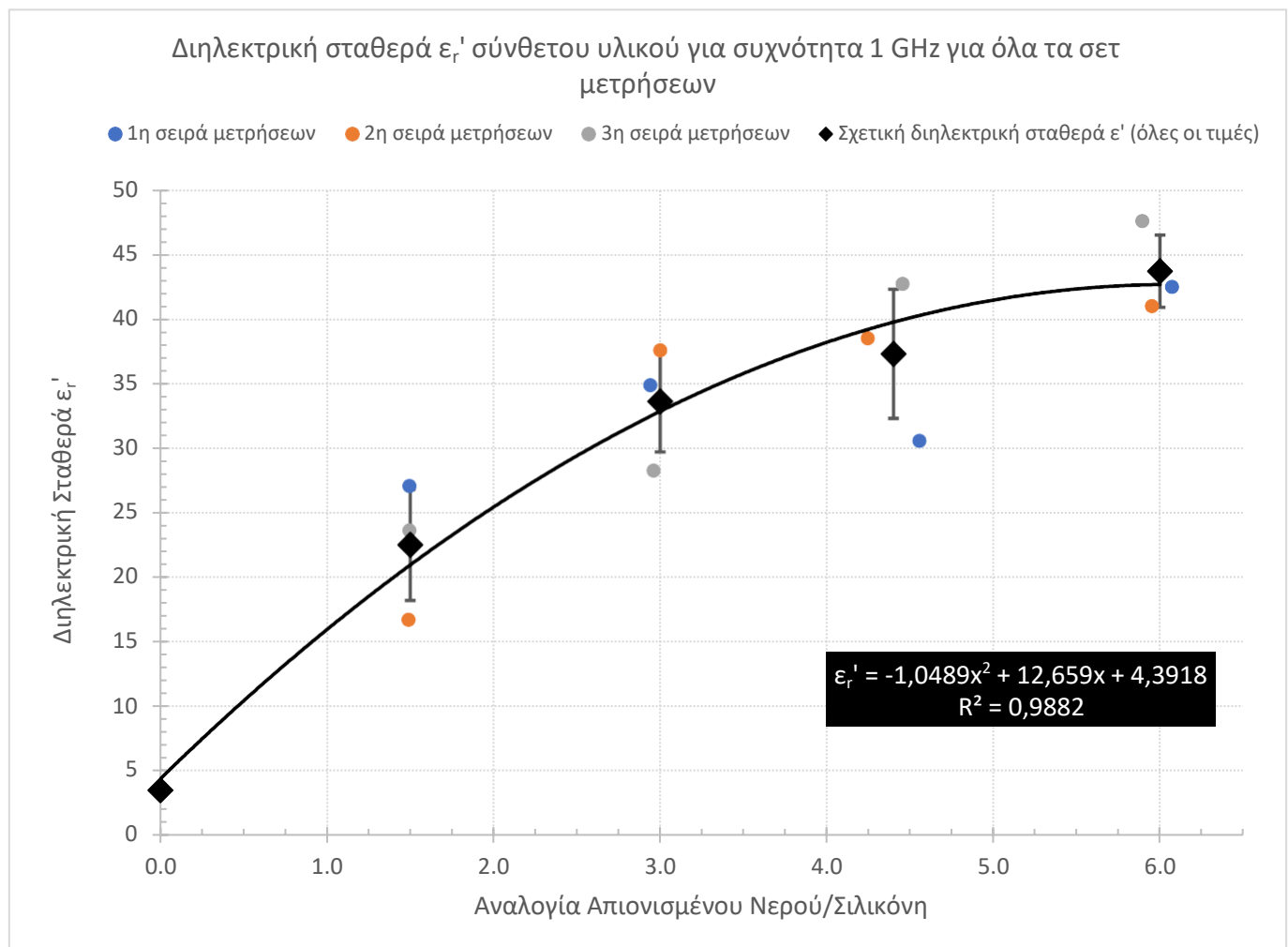
A/A	4,5:1 ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ/ΣΙΛΙΚΟΝΗ - ΜΕΙΓΜΑ 3			
	$\epsilon_r'$	$\epsilon'_{\text{ΜΕΣΗ}}$	Τυπική απόκλιση $\sigma$	Συντελεστής διακύμανσης CV (%)
1η Σειρά Δοκιμίων	30,6	37,3	5,0	13,5
2η Σειρά Δοκιμίων	38,5			
3η Σειρά Δοκιμίων	42,7			

Πίνακας 19: Στατιστικά μεγέθη μείγματος 3 αρχικού πρωτόκολλου

A/A	6:1 ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ/ΣΙΛΙΚΟΝΗ - ΜΕΙΓΜΑ 4			
	$\epsilon_r'$	$\epsilon'_{\text{ΜΕΣΗ}}$	Τυπική απόκλιση $\sigma$	Συντελεστής διακύμανσης CV (%)
1η Σειρά Δοκιμίων	42,5	43,7	2,8	6,5
2η Σειρά Δοκιμίων	41,0			
3η Σειρά Δοκιμίων	47,6			

Πίνακας 20: Στατιστικά μεγέθη μείγματος 4 αρχικού πρωτόκολλου

Με βάση όλα τα δεδομένα των πινάκων έχουμε το ακόλουθο διάγραμμα.



Διάγραμμα 4: Μαθηματικό μοντέλο διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r'$  σύνθετου υλικού με βάση όλες τις πειραματικές τιμές (αρχικό πρωτόκολλο)

Για αναλογία νερού – σιλικόνης ίσο με 0, έχουμε την τιμή διηλεκτρικής σταθεράς της σιλικόνης που μετρήσαμε ίση με  $\epsilon_r' = 3,5$  που συμβαδίζει και με τη βιβλιογραφία. Οι μαύροι ρόμβοι χαρακτηρίζουν τη μέση τιμή διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon'_{\text{ΜΕΣΗ ΤΩΝ 3}^{\text{ου}}}$  σειρών μετρήσεων (πέρα από το σημείο (0, 3.5) που χαρακτηρίζει τη καθαρή σιλικόνη).

Εμείς μελετάμε να βρούμε ένα μαθηματικό μοντέλο εξίσωσης που θα χαρακτηρίζει βέλτιστα τη συμπεριφορά της διηλεκτρικής σταθεράς του σύνθετου υλικού. Οι πιθανές επιλογές μας είναι πολυώνυμα μέχρι 4<sup>ου</sup> βαθμού καθώς έχουμε 5 σημεία και αυτά εμφανίζουν καλή τιμή για το συντελεστή συσχέτισης  $R^2$  και καλή συμπεριφορά γενικότερα. Υψηλή τιμή του  $R^2$  σημαίνει ότι η καμπύλη μας εφαρμόζει βέλτιστα στα σημεία και περνάει από τις μέσες τιμές. Ωστόσο, έτσι θεωρούμε ότι η μέση τιμή που υπολογίζουμε είναι η «σωστή» τιμή και ότι αν πραγματοποιηθεί το πείραμα για τη συγκεκριμένη αναλογία θα έχουμε ως τιμή διηλεκτρικής σταθεράς αυτή του διαγράμματος. Τελικά, επιλέγουμε την εξίσωση 2<sup>ου</sup> βαθμού που φαίνεται να ταιριάζει καλύτερα ( $\epsilon_r' = -1,0489x^2 + 12,659x + 4,3918$ ), όπου  $x$  : η αναλογία απιονισμένου νερού – σιλικόνης.

Πάντως, εμείς βλέπουμε ότι παρουσιάζεται μεγάλη διακύμανση στις τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς (μεγάλη τυπική απόκλιση  $\sigma$ , μεγάλος συντελεστής διακύμανσης CV) για διάφορους λόγους που έχουμε αναφέρει και προηγουμένως (κακή ανάμιξη υλικών, κολλημένη σιλικόνη στη μετρούμενη επιφάνεια, όχι επίπεδα δοκίμια, αέρας ανάμεσα στη μετρούμενη επιφάνεια & τον ανιχνευτή). Επομένως, στην πραγματικότητα δεν μας ενδιαφέρει η μαθηματική εξίσωση από μόνη της αλλά τη συνοδεύουμε με γραμμές σφάλματος (κατακόρυφες μαύρες γραμμές) για να προβάλλουμε τη μεταβλητότητα που συνδέεται με τα σημεία μας.

Για παράδειγμα, στο μείγμα 3 έχουμε τυπική απόκλιση  $\sigma = 5,0$  και μέση τιμή  $\epsilon'_{\text{ΜΕΣΗ}} = 37,3$  σημαίνει ότι έχουμε πιθανότητα 68,2 % (κανονική κατανομή), η τιμή μας να βρίσκεται στο εύρος  $\mu \pm \sigma = [37,3 - 5,0 \text{ έως } 37,3 + 5,0] = [32,3 - 42,3]$ . Αυτή η απόκλιση είναι πολύ μεγάλη και δεν δίνει εγκυρότητα στη χρήση του μοντέλου μας.

Σε αυτό το σημείο, αποφασίζουμε ότι δεν είναι αποδεκτά δεδομένα με συντελεστή διακύμανσης CV άνω του 10%. Επιστρέφουμε στα δεδομένα μας, παρατηρούμε ποιες πειραματικές τιμές διηλεκτρικής σταθεράς αποκλίνουν σημαντικά από τη μέση τιμή και παραθέτουμε τον λόγο απόρριψής τους. Αυτές τις ονομάζουμε απομακρυσμένες τιμές ή outliers.

Μετά από παρατήρηση των τιμών, καταλήγουμε σε 3 απομακρυσμένες τιμές :

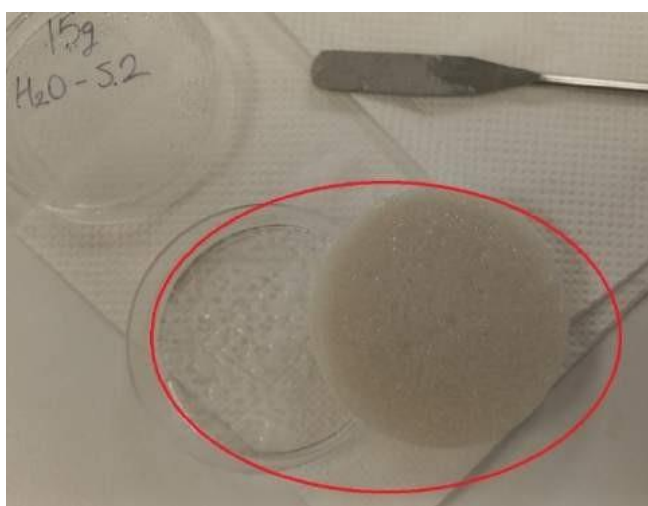
α/α	1η Σειρά Δοκιμίων	2η Σειρά Δοκιμίων	3η Σειρά Δοκιμίων
	$\epsilon_r'$	$\epsilon_r'$	$\epsilon_r'$
Μείγμα 1	27,1	16,7	23,6
Μείγμα 2	34,9	37,6	28,2
Μείγμα 3	30,6	38,5	42,7
Μείγμα 4	42,5	41,0	47,6

Πίνακας 21: Απομακρυσμένες τιμές σειρών δοκιμίων

1<sup>η</sup> σειρά δοκιμίων – Μείγμα 3: Δεν είναι επίπεδο, αέρας εισχωρεί ανάμεσα από το δοκίμιο και τον ανιχνευτή, μειώνει σημαντικά τη διηλεκτρική σταθερά του υλικού.



Εικόνα 73: Προεξοχή του μείγματος 3 της 1<sup>ης</sup> σειράς αρχικού πρωτόκολλου  
2<sup>η</sup> σειρά δοκιμών – Μείγμα 1: Κακή ανάμιξη, πολύ σιλικόνη στη μετρούμενη επιφάνεια, μειώνει σημαντικά τη διηλεκτρική σταθερά του υλικού.



Εικόνα 74: Κολλημένη σιλικόνη στη μετρούμενη επιφάνεια του μείγματος 1 της 2<sup>ης</sup> σειράς αρχικού πρωτόκολλου

3<sup>η</sup> σειρά δοκιμών – Μείγμα 2: Δεν είναι επίπεδο, αέρας εισχωρεί ανάμεσα από το δοκίμιο και τον ανιχνευτή, μειώνει σημαντικά τη διηλεκτρική σταθερά του υλικού.



Εικόνα 75: Προεξοχή του μείγματος 2 της 3<sup>ης</sup> σειράς αρχικού πρωτόκολλου



Τώρα, αφαιρούμε αυτές τις τιμές (outliers) από τον υπολογισμό της μέσης τιμής  $\bar{\epsilon}'_{\text{ΜΕΣΗ}}$ , των υπόλοιπων στατιστικών μεγεθών και έχουμε τα ακόλουθα. Για το μείγμα 4, παρ' όλες τις δυσκολίες στην κατασκευή του, είχαμε τις πιο κοντινές τιμές  $\epsilon'_r$  συνολικά. Δεν τροποποιούμε αυτές τις μετρήσεις.

ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟΣ ΑΠΟΜΑΚΡΥΣΜΕΝΗΣ ΤΙΜΗΣ				
α/α	1,5:1 ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ/ΣΙΛΙΚΟΝΗ - ΜΕΙΓΜΑ 1			
	$\epsilon'_r$	$\bar{\epsilon}'_{\text{ΜΕΣΗ}}$	Τυπική απόκλιση $\sigma$	Συντελεστής διακύμανσης CV (%)
1η Σειρά Δοκιμών	27,1	25,3	1,7	6,8
2η Σειρά Δοκιμών	16,7			
3η Σειρά Δοκιμών	23,6			

Πίνακας 22: Στατιστικά μεγέθη μείγματος 1, δίχως την απομακρυσμένη τιμή

ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟΣ ΑΠΟΜΑΚΡΥΣΜΕΝΗΣ ΤΙΜΗΣ				
α/α	3:1 ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ/ΣΙΛΙΚΟΝΗ - ΜΕΙΓΜΑ 2			
	$\epsilon'_r$	$\bar{\epsilon}'_{\text{ΜΕΣΗ}}$	Τυπική απόκλιση $\sigma$	Συντελεστής διακύμανσης CV (%)
1η Σειρά Δοκιμών	34,9	36,2	1,4	3,7
2η Σειρά Δοκιμών	37,6			
3η Σειρά Δοκιμών	28,2			

Πίνακας 23: Στατιστικά μεγέθη μείγματος 2, δίχως την απομακρυσμένη τιμή

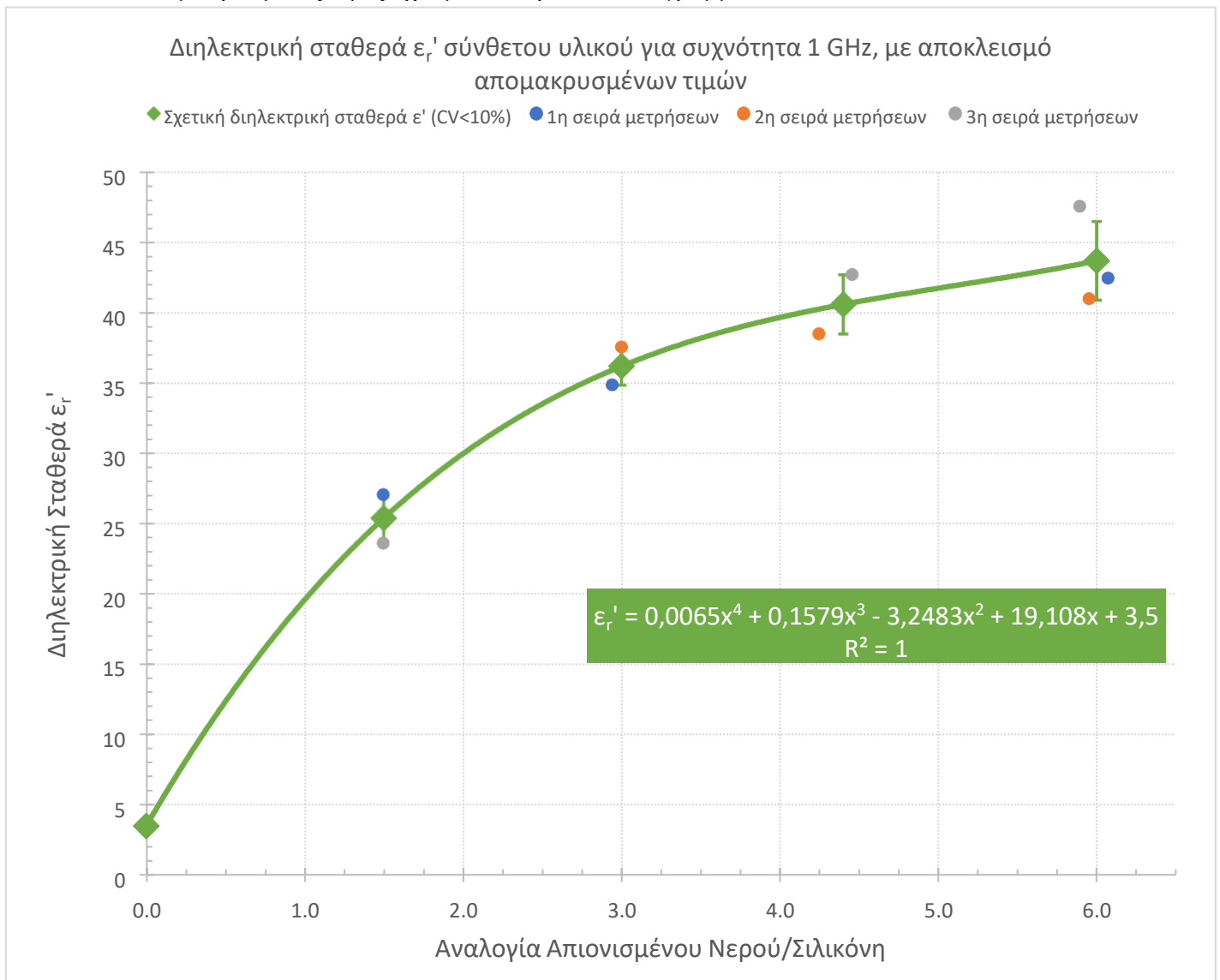
ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟΣ ΑΠΟΜΑΚΡΥΣΜΕΝΗΣ ΤΙΜΗΣ				
α/α	4,5:1 ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ/ΣΙΛΙΚΟΝΗ - ΜΕΙΓΜΑ 3			
	$\epsilon'_r$	$\bar{\epsilon}'_{\text{ΜΕΣΗ}}$	Τυπική απόκλιση $\sigma$	Συντελεστής διακύμανσης CV (%)
1η Σειρά Δοκιμών	30,6	40,6	2,1	5,2
2η Σειρά Δοκιμών	38,5			
3η Σειρά Δοκιμών	42,7			

Πίνακας 24: Στατιστικά μεγέθη μείγματος 3, δίχως την απομακρυσμένη τιμή

ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟΣ ΑΠΟΜΑΚΡΥΣΜΕΝΗΣ ΤΙΜΗΣ				
α/α	6:1 ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ/ΣΙΛΙΚΟΝΗ - ΜΕΙΓΜΑ 4			
	$\epsilon_r'$	$\epsilon'_{\text{ΜΕΣΗ}}$	Τυπική απόκλιση $\sigma$	Συντελεστής διακύμανσης CV (%)
1η Σειρά Δοκιμών	42,5	43,7	2,8	6,5
2η Σειρά Δοκιμών	41,0			
3η Σειρά Δοκιμών	47,6			

Πίνακας 25: Στατιστικά μεγέθη μείγματος 4, δίχως την απομακρυσμένη τιμή (δεν υπάρχει)

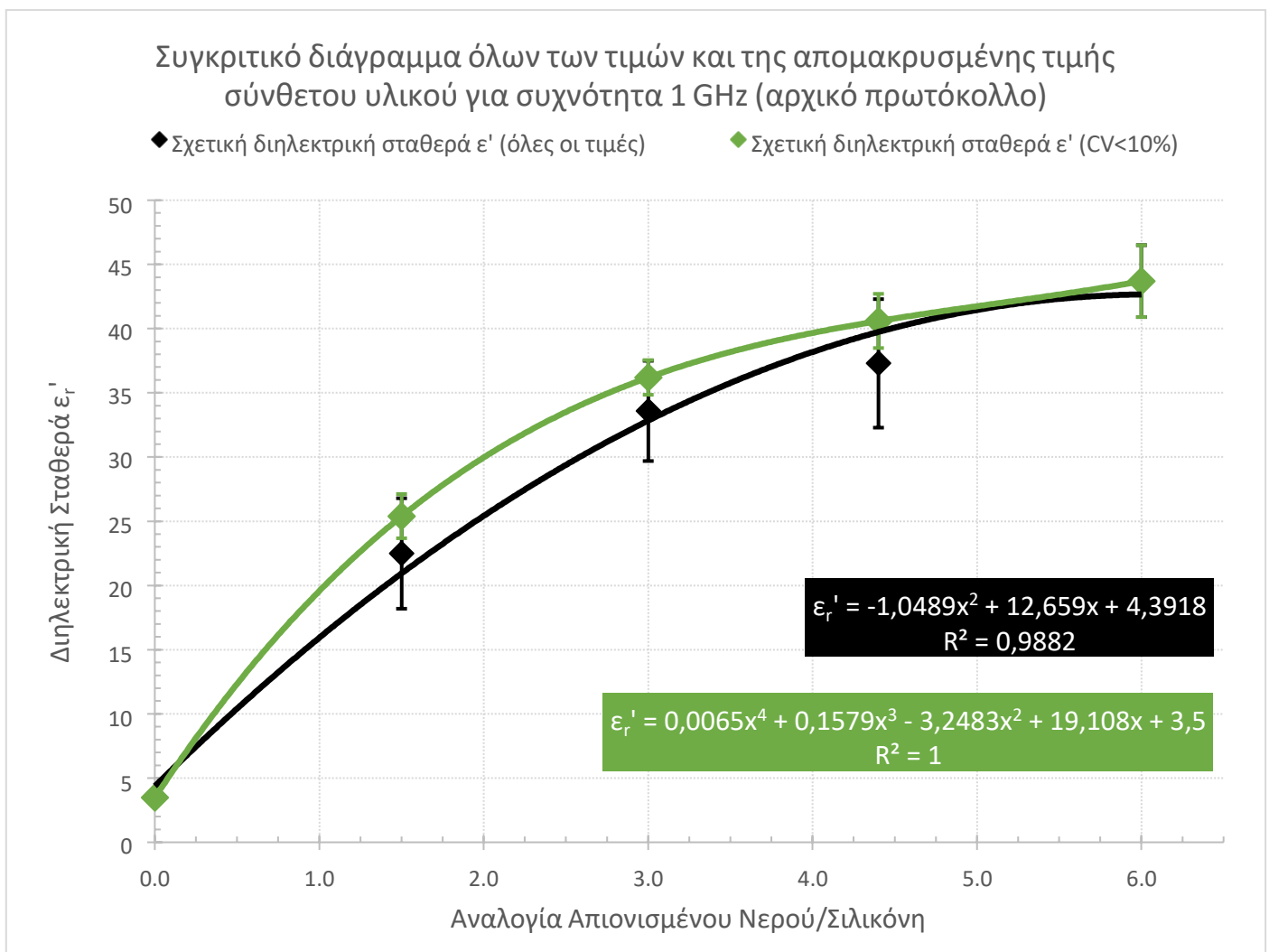
Παρατηρούμε ότι έχουμε χαμηλές τιμές τυπικής απόκλισης  $\sigma$  και συντελεστή διακύμανσης CV. Κάνοντας χρήση αυτών των δεδομένων, έχοντας απορρίψει τις απομακρυσμένες τιμές έχουμε το παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 5: Μαθηματικό μοντέλο διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r'$  σύνθετου υλικού με αποκλεισμό απομακρυσμένων τιμών

Παρατηρούμε, ότι έχουμε πολύ μικρότερη τιμή τυπικής απόκλισης από ότι πριν. Η κλίση της καμπύλης αρχικά είναι μεγάλη και όσο μεγαλώνει η αναλογία απιονισμένου νερού – σιλικόνης έχουμε μείωση του ρυθμού αύξησης της διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r'$ . Αυτή τη φορά διαλέξαμε εξίσωση 4<sup>ου</sup> βαθμού για να περνάει ακριβώς πάνω από τα σημεία μας η καμπύλη. Εδώ βλέπουμε καλύτερη συμπεριφορά ανάμεσα στα σημεία και την καμπύλη, ωστόσο ούτε αυτό το πρότυπο μπορούμε να δεχτούμε διότι δεν μπορούμε απλά να απορρίπτουμε δεδομένα παρόλο που υποδείξαμε τους λόγους. Ήδη οι 3 τιμές του  $\epsilon_r'$  για κάθε αναλογία που μελετάμε δεν είναι πολλές, οπότε με το να επιλέγουμε να αφαιρούμε τιμές δεν δίνουμε ισχύ στο πρωτόκολλο που ακολουθούμε και το μοντέλο που αναπτύσσουμε.

Παρακάτω, έχουμε και συγκριτικό διάγραμμα.



Διάγραμμα 6: Σύγκριση μαθηματικών μοντέλων διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r'$  σύνθετου υλικού με όλες τις τιμές και τον αποκλεισμό τιμής

Γενικά, παρατηρούμε ότι η πράσινη καμπύλη έχει μεγαλύτερη κλίση και πιο ανεβασμένες τιμές διηλεκτρικής σταθεράς από ότι η μαύρη καθώς και μικρότερες γραμμές σφάλματος. Σε αυτό το σημείο, ύστερα από συζήτηση με το εργαστηριακό προσωπικό λαμβάνουμε την απόφαση ο φοιτητής να αναπτύξει ένα καινούργιο πρωτόκολλο κατασκευής δοκιμίων σύνθετου υλικού.

### 5.3 Ανάπτυξη Νέου Πρωτόκολλου

Για την ανάπτυξη και τελική επιλογή του νέου βελτιωμένου πρωτόκολλου, θέτουμε κάποιες προϋποθέσεις:

- ✓ Επιθυμούμε να είναι απλό & κατανοητό
- ✓ Θέλουμε να το αυτοματοποιήσουμε & να έχουμε τη μικρότερη επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα της διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r$  του σύνθετου υλικού
- ✓ Να έχουμε την καλύτερη δυνατή ανάμειξη μεταξύ των υλικών
- ✓ Να μην τροποποιηθεί και κυρίως να μην αυξηθεί πολύ ο χρόνος του πειράματος συγκριτικά με το αρχικό πρωτόκολλο
- ✓ Επαναληψιμότητα, μικρή τιμή τυπικής απόκλισης & συντελεστής μεταβολής  $CV < 5 \%$  στη μετρούμενη επιφάνεια (κάτω επιφάνεια).

Από την πειραματική διαδικασία, είχαμε αντιληφθεί ότι το αρχικό πρωτόκολλο αντιμετώπιζε πρόβλημα στην ανάμειξη των υλικών, όσο αυξάνονταν η αναλογία απιονισμένου νερού – σιλικόνης. Παρόλο που η αναλογία 6:1 έδειξε την καλύτερη συμπεριφορά στη μετρούμενη ηλεκτρική ιδιότητα, εμφάνιζε περίεργη μορφή στα δοκίμια. Ο συνολικός μετρούμενος χρόνος (όχι ο συνολικός χρόνος του πειράματος) ισούται με 14'30'' για το αρχικό πρωτόκολλο, οπότε εμείς θα κυμανθούμε σε αυτά τα όρια με μέγιστο χρόνο τα 20'.

Το νέο πρωτόκολλο βασίζεται κατά κύρια βάση στο αρχικό δηλαδή τα βήματα που ακολουθήσαμε δεν θα αλλάξουν. Ωστόσο, επειδή η διαδικασία της ανάδευσης είναι κουραστική και θέλουμε να την αυτοματοποιήσουμε, εισάγουμε τη χρήση ηλεκτρονικού αναδευτήρα κάθετης περιστροφής Ibx Instruments OS20. Έτσι, απλά θέτουμε τις στροφές που θέλουμε και βεβαιωνόμαστε ότι το ποτήρι ζέσεως είναι σε ασφαλή θέση. Επίσης, θα μεταβληθούν οι θερμοκρασίες και οι χρόνοι ανάμειξης.

Σε κάποια δοκιμαστικά πρωτόκολλα, θα ασχοληθούμε να τα χωρίσουμε σε 2 μέρη, με βάση την αναλογία νερού – σιλικόνης λόγω των δυσκολιών παρασκευής που αντιμετωπίσαμε. Τα πρωτόκολλα δοκιμάζονται για τις μεγαλύτερες αναλογίες νερού – σιλικόνης γιατί μας απασχολεί ο παράγοντας της ανάμειξης των υλικών και αν θα καταφέρει να λιώσει εντελώς το μείγμα.

Όλες οι μετρήσεις διηλεκτρικής σταθεράς πραγματοποιούνται για συχνότητα  $f = 1$  GHz.

#### 1<sup>η</sup> Δοκιμή Ανάπτυξης Νέου Πρωτόκολλου

Δημιουργούμε δοκιμαστικό μείγμα με αναλογία 6:1, το ονομάζουμε mix B.

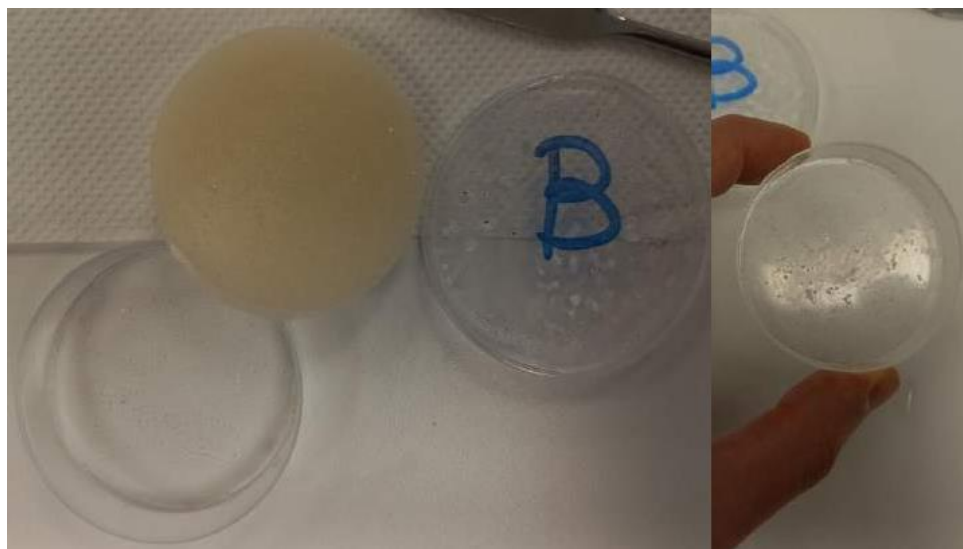
Mix B				
α/α	Απιονισμένο Νερό (g)	Ζελατίνη (g)	Σιλικόνη (g)	Καταλύτης (g)
Θεωρητική Τιμή	60,0	20,0	10,0	0,3
Πραγματική Τιμή	59,9	19,9	9,8	0,6

Πίνακας 26: Δοκιμαστικό δοκίμιο mix B.

Δοκιμάζουμε να αυξήσουμε την αρχική και τελική θερμοκρασία, εισάγουμε ηλεκτρικό αναδευτήρα & μεταβάλλουμε τους χρόνους.

#### Πειραματική Διαδικασία

- 1) Ενεργοποιούμε τη θερμαινόμενη πλάκα και τη θέτουμε σε θερμοκρασία 44°C.
- 2) Περιμένουμε μέχρι η επιφάνεια της πλάκας να φτάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία.
- 3) Αναμιγνύουμε το απιονισμένο νερό με τη χοιρινή ζελατίνη σε ποτήρι ζέσεως/πλαστικό ποτήρι, με τον ηλεκτρικό αναδευτήρα στα 75 rpm
- 4) Τοποθετούμε το ποτήρι ζέσεως στη θερμαινόμενη πλάκα.
- 5) Αυξάνουμε τη θερμοκρασία στους 78°C.
- 6) Ανάμειξη με τον ηλεκτρονικό αναδευτήρα μέχρι η συγκεκριμένη θερμοκρασία να επιτευχθεί.
- 7) Μόλις φτάσουμε τους 78°C, συνεχίζουμε να αναμιγνύουμε για 5' στα 96 rpm
- 8) Αφαιρούμε το ποτήρι ζέσεως από την πλάκα, προσθέτουμε την ποσότητα σιλικόνης, επιστρέφουμε το δοχείο στην πλάκα και αναμιγνύουμε για 5' στα 96 rpm στους 78°C.
- 9) Αφαιρούμε το ποτήρι ζέσεως από την πλάκα και αναμιγνύουμε για 2'30''.
- 10) Επανατοποθέτηση δοχείου στην πλάκα και μίξη για 2'30'' στοις 78°C.
- 11) Αφαιρούμε το ποτήρι από την πλάκα, μετράμε και προσθέτουμε την ποσότητα του καταλύτη στο μείγμα, ανάμειξη στοις 78°C για 3' στα 60 rpm
- 12) Έγχυση στο καλούπι.
- 13) Σφραγίζουμε με το φιλμ το εξεταζόμενο δοκίμιο και το τοποθετούμε στο ψυγείο για ψύξη



Εικόνα 76: Δοκιμαστικό δοκίμιο mix B

#### Παρατηρήσεις mix B:

Το δοκίμιο mix B είναι καλό, καθώς πραγματοποιήθηκε καλή ανάμειξη, είχαμε ομογένεια στο δοκίμιο και έχουμε λίγα σταγονίδια κολλημένα στο καλούπι. Όταν μετρήσαμε τη διηλεκτρική σταθερά του αυτή ισούται με 43,8. Από τις προηγούμενες μετρήσεις, η τιμή αυτή είναι λογική συγκρίνοντας την με τα προηγούμενα δοκίμια ίδιας αναλογίας 6:1. Ο συνολικός μετρούμενος χρόνος είναι ίσος με 18'.

## 2<sup>η</sup> Δοκιμή Ανάπτυξης Νέου Πρωτόκολλου

Αυτή τη φορά αποφασίζουμε να διαχωρίσουμε το πρωτόκολλο σε 2 μέρη, για αναλογία νερού – σιλικόνης μέχρι 4:1 και για αναλογία 4:1 – 6:1.

Δημιουργούμε δοκιμαστικά μείγματα με αναλογία 3,9:1 και 6:1, τα ονομάζουμε δοκίμιο I & II.

Δοκίμιο I				
α/α	Απιονισμένο Νερό (g)	Ζελατίνη (g)	Σιλικόνη (g)	Καταλύτης (g)
Θεωρητική Τιμή	39,0	13,0	10	0,3
Πραγματική Τιμή	39,0	13,1	11,0	0,3

Πίνακας 27: Δοκιμαστικό δοκίμιο I

Δοκιμάζουμε να αυξήσουμε την αρχική θερμοκρασία, αυξάνουμε στροφές, μεταβάλλουμε τους χρόνους & δεν αφαιρούμε το ποτήρι ζέσεως από τη θερμαινόμενη πλάκα.

### Πειραματική Διαδικασία

- 1) Ενεργοποιούμε τη θερμαινόμενη πλάκα και τη θέτουμε σε θερμοκρασία 45°C και παράλληλα μετράμε την ποσότητα του καταλύτη που θα εισάγουμε στο μείγμα.
- 2) Περιμένουμε μέχρι η επιφάνεια της πλάκας να φτάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία.
- 3) Αναμιγνύουμε το απιονισμένο νερό με τη χοιρινή ζελατίνη σε ποτήρι ζέσεως/πλαστικό ποτήρι, με τον ηλεκτρικό αναδευτήρα στα 80 rpm
- 4) Τοποθετούμε το ποτήρι ζέσεως στη θερμαινόμενη πλάκα.
- 5) Αυξάνουμε τη θερμοκρασία στους 75°C.
- 6) Ανάμειξη με τον ηλεκτρονικό αναδευτήρα μέχρι η συγκεκριμένη θερμοκρασία να επιτευχθεί.
- 7) Μόλις φτάσουμε τους 75°C, συνεχίζουμε να αναμιγνύουμε για 3'30'' στα 80 rpm
- 8) Αφαιρούμε το ποτήρι ζέσεως από την πλάκα, προσθέτουμε την ποσότητα σιλικόνης, επιστρέφουμε το δοχείο στην πλάκα και αναμιγνύουμε για 8' στα 80 rpm στους 75°C.
- 9) ΔΕΝ αφαιρούμε το ποτήρι από την πλάκα, απλά προσθέτουμε την ποσότητα του καταλύτη στο μείγμα και αναμειγνύουμε στοις 75°C για 3' στα 60 rpm
- 10) Έγχυση στο καλούπι.
- 11) Σφραγίζουμε με το φιλμ το εξεταζόμενο δοκίμιο και το τοποθετούμε στο ψυγείο για ψύξη



Εικόνα 77: Δοκιμαστικό δοκίμιο I

Παρατηρήσεις δοκιμίου I:

Δεν έχει γίνει καλή μίξη, γλιστράει η κάτω επιφάνεια από την κολλημένη σιλικόνη. Η μετρούμενη τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r$  ισούται με 34,3 (μέσα στα αναμενόμενα όρια). Ο συνολικός μετρούμενος χρόνος είναι ίσος με 14'30''.

Δοκίμιο II				
α/α	Απιονισμένο Νερό (g)	Ζελατίνη (g)	Σιλικόνη (g)	Καταλύτης (g)
Θεωρητική Τιμή	60,0	20,0	10,0	0,3
Πραγματική Τιμή	59,9	20,0	10,4	0,4

Πίνακας 28: Δοκιμαστικό δοκίμιο II

Πειραματική Διαδικασία

- 1) Ενεργοποιούμε τη θερμαινόμενη πλάκα και τη θέτουμε σε θερμοκρασία 45°C και παράλληλα μετράμε την ποσότητα του καταλύτη που θα εισάγουμε στο μείγμα.
- 2) Περιμένουμε μέχρι η επιφάνεια της πλάκας να φτάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία.
- 3) Αναμιγνύουμε το απιονισμένο νερό με τη χοιρινή ζελατίνη σε ποτήρι ζέσεως/πλαστικό ποτήρι, με τον ηλεκτρικό αναδευτήρα στα 80 rpm
- 4) Τοποθετούμε το ποτήρι ζέσεως στη θερμαινόμενη πλάκα.
- 5) Αυξάνουμε τη θερμοκρασία στους 80°C.

- 6) Ανάμειξη με τον ηλεκτρονικό αναδευτήρα μέχρι η συγκεκριμένη θερμοκρασία να επιτευχθεί.
- 7) Μόλις φτάσουμε τους 80°C, συνεχίζουμε να αναμιγνύουμε για 2'30'' στα 80 rpm
- 8) Αφαιρούμε το ποτήρι ζέσεως από την πλάκα, προσθέτουμε την ποσότητα σιλικόνης, επιστρέφουμε το δοχείο στην πλάκα και αναμιγνύουμε για 9' στα 90 rpm στους 80°C.
- 9) ΔΕΝ αφαιρούμε το ποτήρι από την πλάκα, απλά προσθέτουμε την ποσότητα του καταλύτη στο μείγμα και αναμιγνύουμε στοις 80°C για 1'30'' στα 60 rpm και άλλα 1'30'' στα 100 rpm.
- 10) Έγχυση στο καλούπι.
- 11) Σφραγίζουμε με το φιλμ το εξεταζόμενο δοκίμιο και το τοποθετούμε στο ψυγείο για ψύξη



Εικόνα 78: Δοκιμαστικό δοκίμιο II

Παρατηρήσεις δοκιμίου II:

Έχουμε πολύ κακή ανάμιξη μεταξύ των υλικών, γλιστράει η κάτω επιφάνεια από την κολλημένη σιλικόνη. Η μετρούμενη τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς ε' ισούται με 25,4 (πολύ χαμηλότερη από την αναμενόμενη). Ο συνολικός μετρούμενος χρόνος είναι ίσος με 14'30''.

Συνεχίζουμε την ίδια διαδικασία, δημιουργώντας καινούργια πρωτόκολλα και εξετάζοντας τα δοκίμια τους. Μεταβάλλουμε τη σειρά ανάμειξης των υλικών,



αυξάνουμε τις στροφές του ηλεκτρονικού αναδευτήρα, ρυθμίζουμε τις θερμοκρασίες (τις αυξάνουμε) και αλλάζουμε τους χρόνους ανάμιξης για να δώσουμε πιο υγρή μορφή στα μείγματα μας.

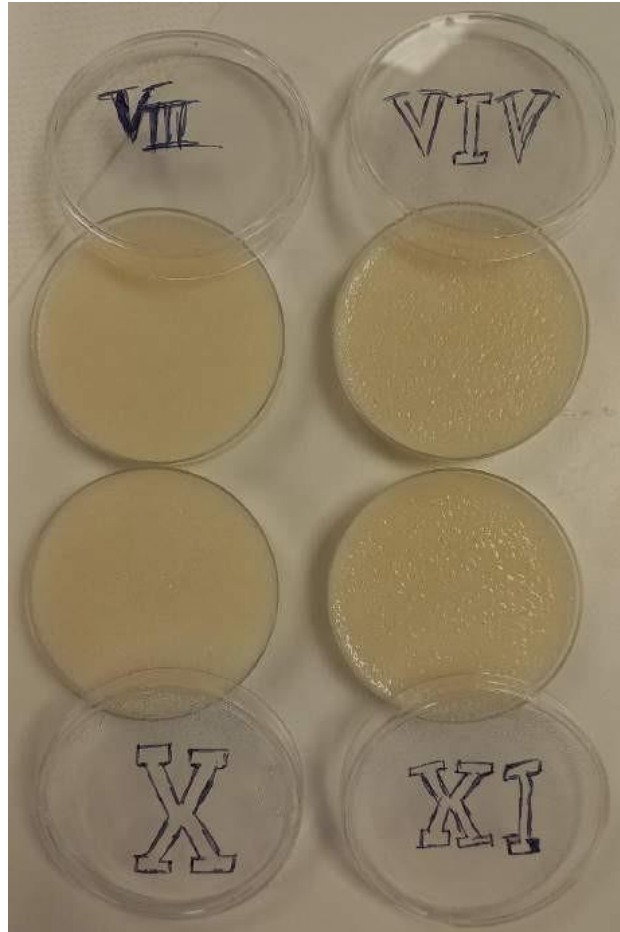
Ύστερα από 5 πρωτόκολλα και 7 εξεταζόμενα δοκίμια, ξεκινάμε να αντιλαμβανόμαστε ποιες αλλαγές στις μεταβλητές μας είναι απαραίτητες για να έχουμε ένα καλό εμφανισιακά και μετρητικά σύνθετο υλικό.



Εικόνα 79: Πρώτα 7 εξεταζόμενα δοκίμια με βάση 5 αναπτυσσόμενα πρωτόκολλα

Τα δοκίμια VI, VII αναδεικνύουν καλή συμπεριφορά στις μετρήσεις της διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon'$  και στη μορφή τους. Οι κύριοι παράγοντες βελτίωσης των δοκιμίων ήταν η αύξηση της τελικής θερμοκρασίας θερμαινόμενης πλάκας στους  $90^{\circ}\text{C}$  και η αύξηση των στροφών του αναδευτήρα στα 500 rpm κατά την εισαγωγή της σιλικόνης στο μείγμα ενώ ο συνολικός χρόνος αναμίξεων είναι αρκετά μικρός στα 9' – 9'30''.

Αναπτύσσουμε άλλα 2 πρωτόκολλα και εξετάζουμε 4 δοκίμια. Σε αυτά δοκιμάζουμε να μεταβάλλουμε τους χρόνους ανάμιξης, τις στροφές και αν η αφαίρεση του ποτηριού ζέσεως από τη θερμαινόμενη επιφάνεια, επιφέρει κάποιο θετικό στοιχείο στο τελικό αποτέλεσμα.



Εικόνα 80: Εξεταζόμενα δοκίμια VIII, VIV, X, XI

Όλα τα δοκίμια κολλάνε λίγο κατά την επαφή με την πάνω επιφάνεια, εμφανίζουν ελάχιστα σταγονίδια στην επιφάνεια του καλουπιού αλλά τα VIII (αναλογία 3,9:1), VIV (αναλογία 6:1) που έχουν παραχθεί από το ίδιο πρωτόκολλο είναι ελάχιστα καλύτερα από τα αντίστοιχα X, XI στο θέμα της ανάμειξης.



Εικόνα 81: Κάτω επιφάνεια καλουπιών δοκιμίων VIII, VIV παραγόμενα από το ίδιο πρωτόκολλο



Εικόνα 82: Κάτω επιφάνεια καλουπιών δοκιμίων X, XI παραγόμενα από το ίδιο πρωτόκολλο

Η διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon'$  των υλικών είναι :

$$\epsilon'_{\text{VIII}}, (3,9:1 \text{ ΑΝΑΛΟΓΙΑ}) = 44,1$$

$$\epsilon'_{\text{X}}, (3,9:1 \text{ ΑΝΑΛΟΓΙΑ}) = 44,5$$

$$\epsilon'_{\text{IV}}, (6:1 \text{ ΑΝΑΛΟΓΙΑ}) = 51,6$$

$$\epsilon'_{\text{XI}}, (6:1 \text{ ΑΝΑΛΟΓΙΑ}) = 51,1$$

Βλέπουμε ότι έχουμε παραπλήσιες τιμές  $\epsilon'$  για ίδια αναλογία νερού – σιλικόνης, ακόμη και αν τα δοκίμια δεν έχουν παραχθεί από το ίδιο πρωτόκολλο. Σε αυτό το σημείο, πρακτικά λαμβάνουμε υπόψιν μας τις λεπτομέρειες και πραγματοποιούμε μικρό αλλαγές. Ο κύριος κορμός της πειραματικής διαδικασίας έχει κατοχυρωθεί. Αντιλαμβανόμαστε ότι έχουμε αντιμετωπίσει σε μεγάλο βαθμό το πρόβλημα της ανάμειξης, για αυτό παύουμε να χωρίζουμε το πρωτόκολλο μας σε 2 μέρη. Από εδώ και τώρα, ασχολούμαστε μόνο με την αναλογία 6:1.

Πραγματοποιούμε άλλα 4 πρωτόκολλα με 1 δοκίμιο για κάθε ένα.

Όλα τα δοκίμια XII, XIII, XIV, XV κολλάνε ελάχιστα κατά την επαφή μόνο με την πάνω επιφάνεια, εμφανίζουν ελάχιστα σταγονίδια στην επιφάνεια των καλουπιών. Αυτό δεν μπορούμε να το αποφύγουμε γιατί η σιλικόνη είναι υδρόφοβη και δεν είναι δυνατόν να διαλυθεί πλήρως στο νερό. Εμείς προσπαθούμε να ελαχιστοποιήσουμε την εμφάνιση της σιλικόνης πάνω στο καλούπι και να αναμειχθεί όσο μπορεί με τα υπόλοιπα υλικά.

Η διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon'$  που μετρήθηκε ισούται με :

$$\epsilon'_{\text{XII}}, (6:1 \text{ ΑΝΑΛΟΓΙΑ}) = 51,6$$

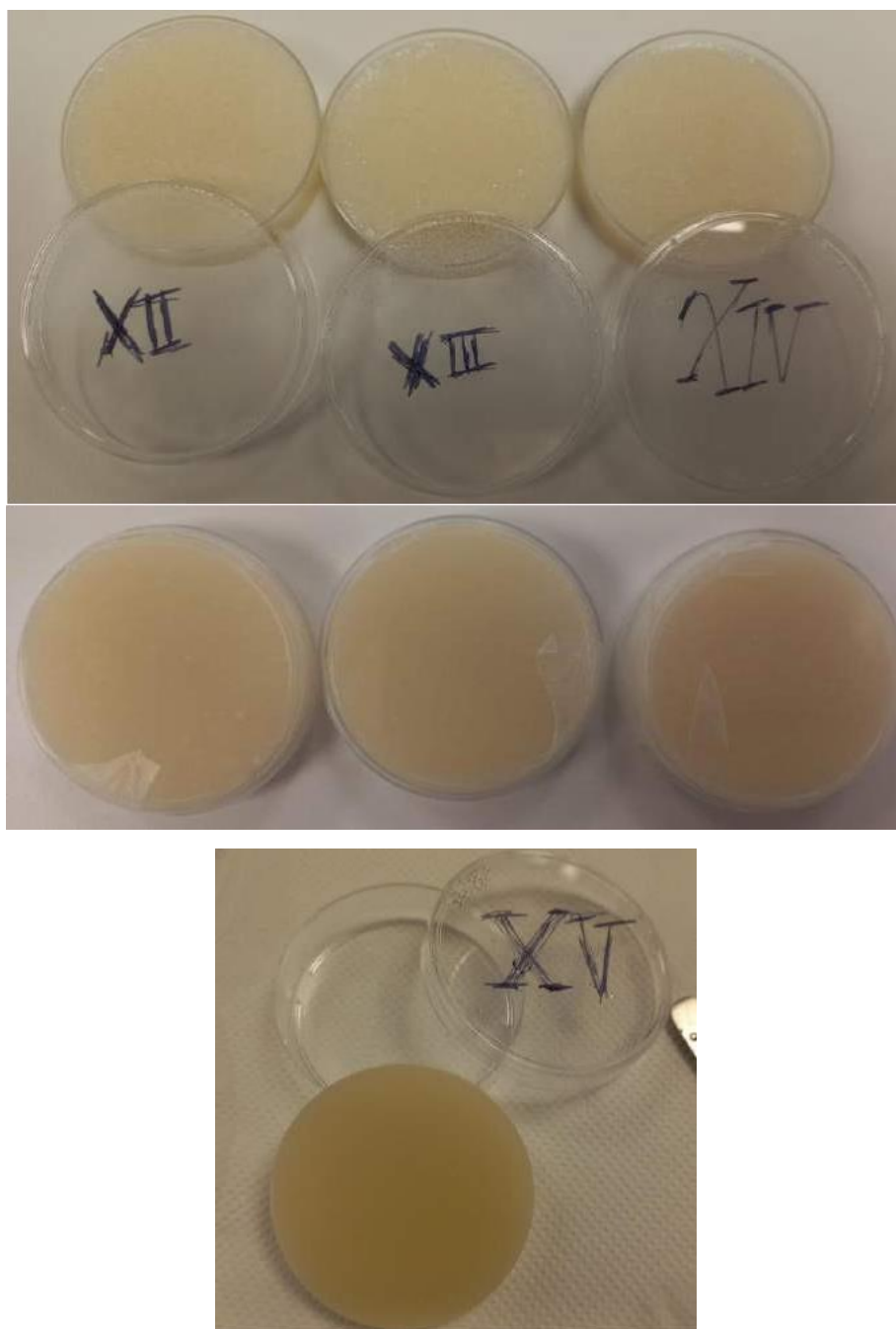
$$\epsilon'_{\text{XIII}}, (6:1 \text{ ΑΝΑΛΟΓΙΑ}) = 52,4$$

$$\epsilon'_{\text{XIV}}, (6:1 \text{ ΑΝΑΛΟΓΙΑ}) = 48,9$$

$\varepsilon'_{XV}, (6:1 \text{ ΑΝΑΛΟΓΙΑ}) = 51,2$

Γενικά, βλέπουμε ότι βρισκόμαστε στην τιμή  $\varepsilon' = 50$  για αυτή την αναλογία.

Ύστερα από ανάπτυξη περισσότερων από 10 πρωτόκολλων και εξέταση 15 δοκιμίων, καταλήγουμε ότι το δοκίμιο XIII και το πρωτόκολλο του ήταν το καλύτερο και το επιλέγουμε γιατί σε αυτό είχαμε την καλύτερη ανάμειξη μεταξύ των υλικών. Η αλήθεια είναι ότι όλα τα δοκίμια ήταν παρόμοια μεταξύ τους και ότι η επιλογή κρίθηκε σε μικρολεπτομέρειες. Η επαφή του δοκιμίου με το δέρμα, η οπτική εμφάνιση του υλικού, η συνολική ανάμειξη, οι χρόνοι ανάμιξης και η καθαρή μη κολλώδης κάτω επιφάνεια του καλουπιού ήταν όλοι παράγοντες για την επιλογή του πρωτόκολλου. Ο συνολικός μετρούμενος χρόνος του πειράματος ισούται με 17'.



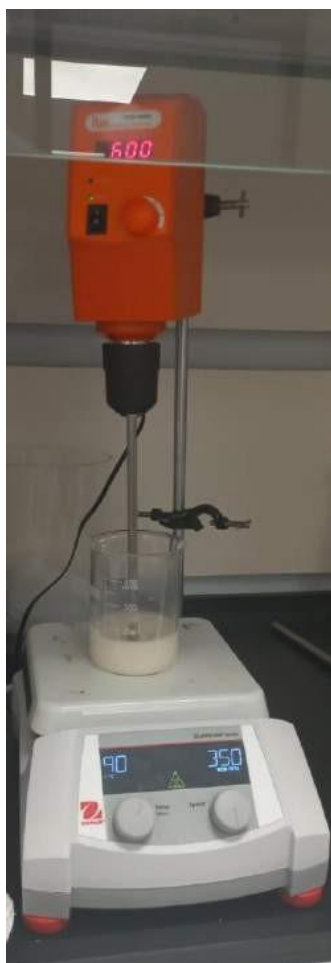
Εικόνα 83: Εξεταζόμενα δοκίμια XII, XII, XIV & XV



Εικόνα 84: Κάτω επιφάνεια καλουπιού για τα εξεταζόμενα δοκίμια XII, XII, XIV & XV

#### Τελικό Καινούργιο Πρωτόκολλο

- 1) Ενεργοποιούμε τη θερμαινόμενη πλάκα και τη θέτουμε σε θερμοκρασία 40°C και παράλληλα μετράμε την ποσότητα του καταλύτη που θα εισάγουμε στο μείγμα αργότερα.
- 2) Περιμένουμε μέχρι η επιφάνεια της πλάκας να φτάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία.
- 3) Αναμιγνύουμε το απιονισμένο νερό με τη χοιρινή ζελατίνη σε κατάλληλο ποτήρι ζέσεως/πλαστικό ποτήρι, με τον ηλεκτρικό αναδευτήρα στα 600 rpm
- 4) Τοποθετούμε το ποτήρι ζέσεως στη θερμαινόμενη πλάκα.
- 5) Αυξάνουμε τη θερμοκρασία στους 90°C.
- 6) Ανάμειξη με τον ηλεκτρονικό αναδευτήρα στα 600 rpm, μέχρι η συγκεκριμένη θερμοκρασία να επιτευχθεί.
- 7) Μόλις φτάσουμε τους 90°C, συνεχίζουμε να αναμιγνύουμε για 3' στα 600 rpm



Εικόνα 85: Ηλεκτρονικός αναδευτήρας στα 600 rpm

- 8) Αφαιρούμε το ποτήρι ζέσεως από την πλάκα, προσθέτουμε την ποσότητα σιλικόνης, επιστρέφουμε το δοχείο στην πλάκα και αναμιγνύουμε για 4' στα 600 rpm στους 90°C.
- 9) Αφαιρούμε το ποτήρι ζέσεως από την πλάκα και αναμιγνύουμε για 3' στα 600 rpm στους 90°C.
- 10) Επανατοποθέτηση δοχείου στην πλάκα και μίξη για 3' στα 600 rpm στους 90°C.
- 11) Προσθέτουμε την ποσότητα του καταλύτη στο μείγμα και αναμιγνύουμε στους 90°C για 4' στα 600 rpm
- 12) Έγχυση στο καλούπι.
- 13) Σφραγίζουμε με το φιλμ το εξεταζόμενο δοκίμιο και το τοποθετούμε στο ψυγείο για ψύξη

*Υποσημείωση: Οι στροφές που θέτουμε στον αναδευτήρα μπορούν να έχουν απόκλιση έως και 15 rpm από την αναφερόμενη τιμή.*

#### **5.4 Έλεγχος Επαναληψιμότητας Νέου Πρωτόκολλου**

Έχοντας κατασταλάξει στην επιλογή του νέου πρωτόκολλου, εξετάζουμε την επαναληψιμότητα των τιμών της διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r$  του σύνθετου υλικού.

Αρχικά, επιλέγουμε να δημιουργήσουμε 3 σειρές δοκιμίων μόνο για την αναλογία νερού – σιλικόνης 6:1. Εφόσον, μετρήσουμε παραπλήσιες τιμές του  $\epsilon_r$  μεταξύ των

δοκιμίων τότε θα εξετάσουμε και τις αναλογίες 1,5:1 , 3:1 και 4,5:1, όπως ακριβώς κάναμε με το αρχικό πρωτόκολλο.

Επαναληψιμότητα Δοκιμίου Αναλογίας Απιονισμένου Νερού – Σιλικόνης 6:1

Ακολουθούμε την πειραματική διαδικασία του νέου πρωτόκολλου 3 διαφορετικές μέρες και κατασκευάζουμε 1 δοκιμαστικό δοκίμιο για την κάθε μέρα.

Ημέρα 1<sup>η</sup> , 2<sup>η</sup> & 3<sup>η</sup> (Day 1,2 & 3)

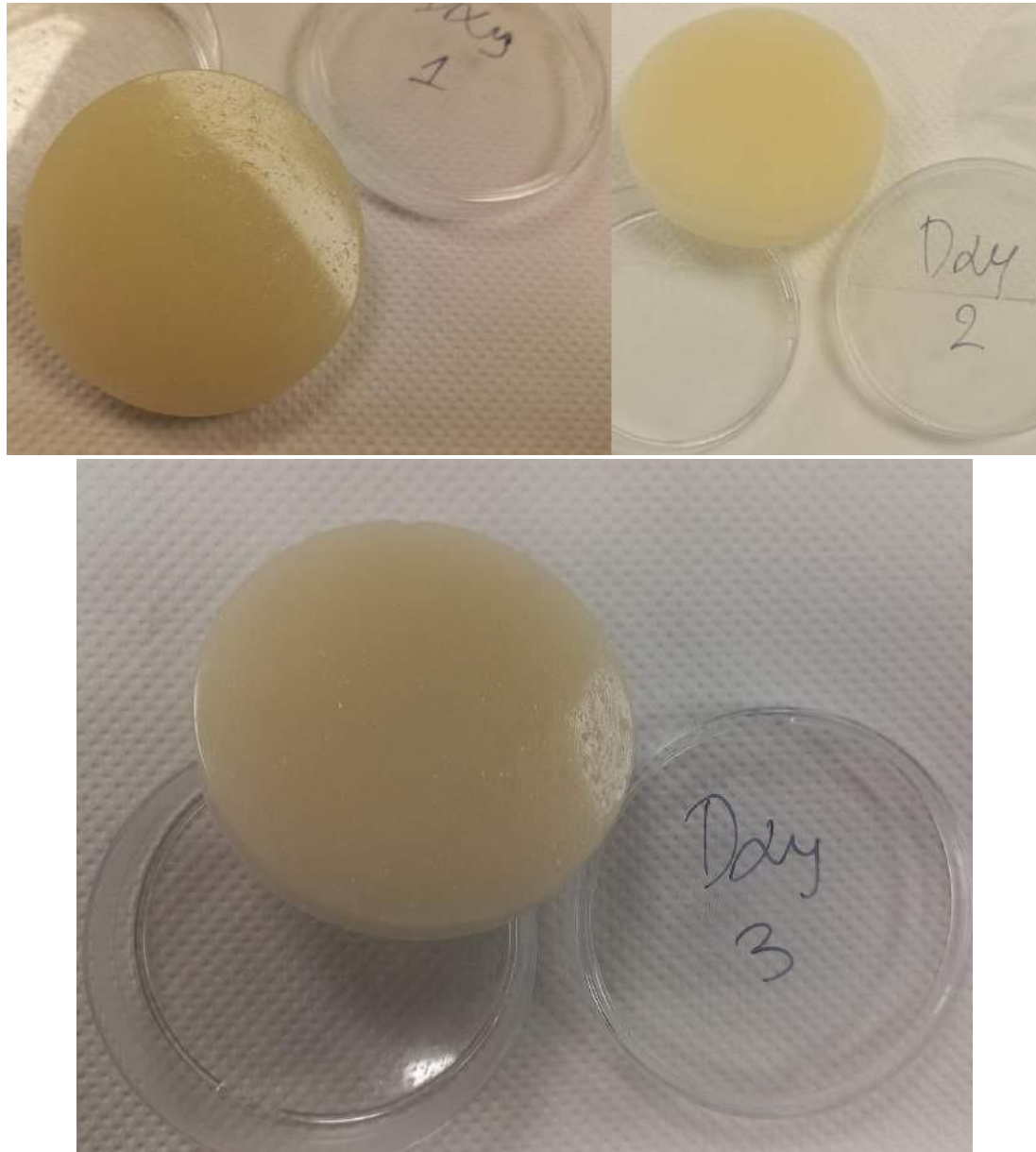
Παραθέτουμε συνολικά, τις ποσότητες και τις αναλογίες που χρησιμοποιηθήκαν για τα 3 δοκιμαστικά δοκίμια.

Δοκιμαστικό Δοκίμιο 6:1				
α/α	Απιονισμένο Νερό (g)	Ζελατίνη (g)	Σιλικόνη (g)	Καταλύτης (g)
Θεωρητική Τιμή	60,0	20,0	10,0	0,3
Ημέρα 1 <sup>η</sup> - Μετρούμενη Τιμή	60,0	20,2	10,1	0,3
Ημέρα 2 <sup>η</sup> - Μετρούμενη Τιμή	60,0	20,1	9,8	0,3
Ημέρα 3 <sup>η</sup> - Μετρούμενη Τιμή	59,9	20,1	9,8	0,3

Πίνακας 29: Δοκιμαστικό δοκίμιο αναλογίας 6:1, για όλες τις μέρες

Δοκιμαστικό Δοκίμιο 6:1 – Αναλογίες Υλικών & ε <sub>r</sub> '				
Μετρούμενη Συχνότητα Διηλεκτρικής Σταθεράς f = 1 GHz				
α/α	Λόγος Νερό-Ζελατίνη	Λόγος Νερό-Σιλικόνη	Λόγος Καταλύτη-Σιλικόνης (%)	ε <sub>r</sub> '
Ημέρα 1 <sup>η</sup>	3,0	5,9	3%	51,9
Ημέρα 2 <sup>η</sup>	3,0	6,1	3%	52,0
Ημέρα 3 <sup>η</sup>	3,0	6,1	3%	52,3

Πίνακας 30: Αναλογίες & τιμή ε<sub>r</sub>' δοκιμίων αναλογίας 6:1 για όλες τις μέρες



Εικόνα 86: Μετρούμενη επιφάνεια δοκιμίων, αναλογίας 6:1 για όλες τις μέρες.

Γενικά, όλα τα δοκίμια έχουν ομοιογενοποιηθεί αρκετά καλά και παρουσιάζουν ελάχιστα σταγονίδια στην επιφάνεια του καλουπιού.

α/α	6:1 ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ/ΣΙΛΙΚΟΝΗ - ΜΕΙΓΜΑ 4 – ΝΕΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ			
	$\epsilon_r'$	$\epsilon'_{\text{ΜΕΣΗ}}$	Τυπική απόκλιση $\sigma$	Συντελεστής διακύμανσης CV (%)
1η Ημέρα	51,9	52,1	0,2	0,3
2η Ημέρα	52,0			
3η Ημέρα	52,3			

Πίνακας 31: Διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r'$  δοκιμίων αναλογίας 6:1 για το νέο πρωτόκολλο  
 Συμπεραίνουμε, ότι τα δοκίμια μας επιδεικνύουν πολύ καλή συμπεριφορά στην επαναληψιμότητα της τιμής  $\epsilon_r$  και πληρούν όλες τις προϋποθέσεις μας. Έχουμε πολύ μικρή τιμή τυπικής απόκλισης  $\sigma$  και συντελεστή διακύμανσης CV < 5%. Σε αυτό το σημείο, εξετάζουμε και τις αναλογίες απιονισμένου νερού 1,5:1 , 3:1 & 4,5:1 για να διερευνήσουμε εάν θα έχουμε παρόμοια αποτελέσματα.



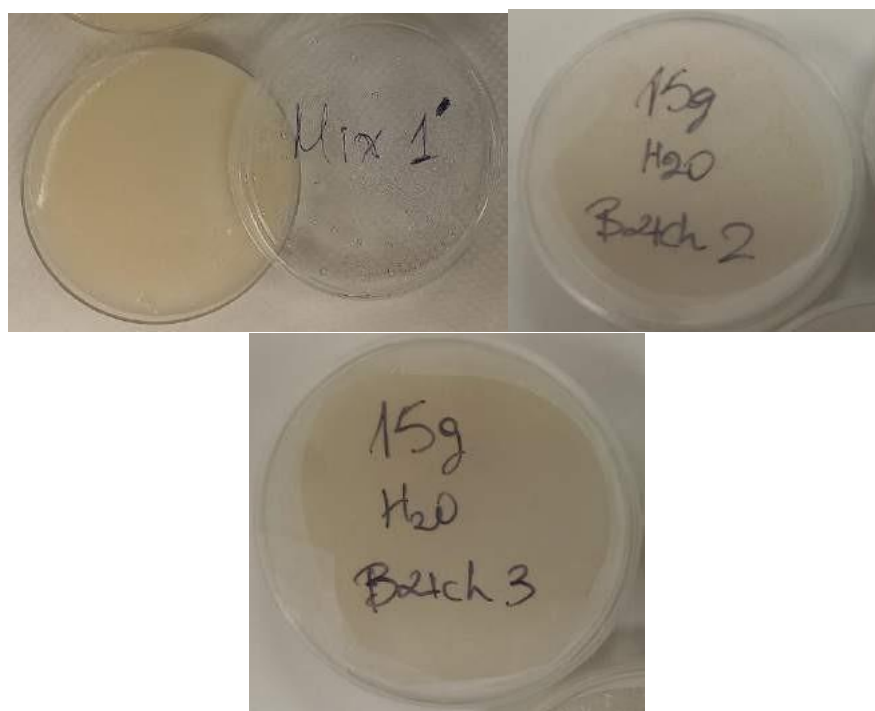
Επαναληψιμότητα Δοκιμίου Αναλογίας Απιονισμένου Νερού – Σιλικόνης 1,5:1 , 3:1 & 4,5:1

Δοκιμαστικό δοκίμιο 1,5:1

Η σειρά δοκιμίων με αναλογία 1,5:1, με βάση το νέο πρωτόκολλο.

Δοκιμαστικό Δοκίμιο 1,5:1 – Αναλογίες Υλικών & $\epsilon_r'$				
Μετρούμενη Συχνότητα Διηλεκτρικής Σταθεράς $f = 1 \text{ GHz}$				
α/α	Λόγος Νερό-Ζελατίνη	Λόγος Νερό-Σιλικόνη	Λόγος Καταλύτη-Σιλικόνης (%)	$\epsilon_r'$
Ημέρα 1 <sup>η</sup>	3,1	1,5	4%	31,3
Ημέρα 2 <sup>η</sup>	3,1	1,5	4%	30,0
Ημέρα 3 <sup>η</sup>	2,9	1,5	4%	29,9

Πίνακας 32: Αναλογίες & τιμή  $\epsilon_r'$  δοκιμίων αναλογίας 1,5:1 για όλες τις μέρες



Εικόνα 87: Δοκιμαστικά δοκίμια, αναλογίας 1,5:1, για 3 διαφορετικές μέρες

α/α	1,5:1 ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ/ΣΙΛΙΚΟΝΗ - ΜΕΙΓΜΑ 1 – ΝΕΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ			
	$\epsilon_r'$	$\epsilon_r'$ ΜΕΣΗ	Τυπική απόκλιση $\sigma$	Συντελεστής διακύμανσης CV (%)
1η Ημέρα	31,3	30,4	0,6	2,1
2η Ημέρα	30,0			
3η Ημέρα	29,9			

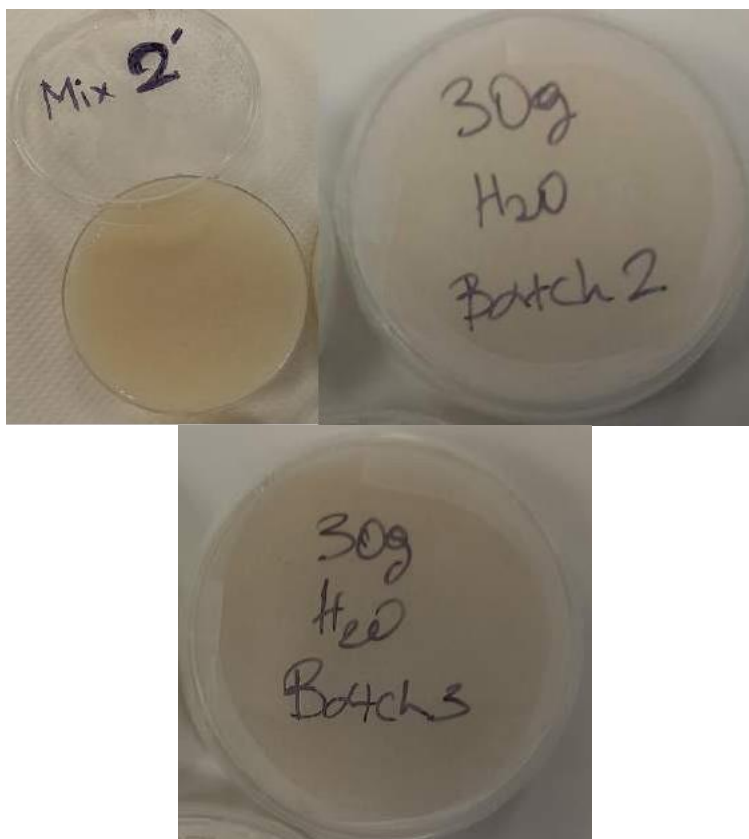
Πίνακας 33: Διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r'$  δοκιμίων αναλογίας 1,5:1 για το νέο πρωτόκολλο

### Δοκιμαστικό δοκίμιο 3:1

Η σειρά δοκιμίων με αναλογία 3:1, με βάση το νέο πρωτόκολλο.

Δοκιμαστικό Δοκίμιο 3:1 – Αναλογίες Υλικών & $\epsilon_r'$				
Μετρούμενη Συχνότητα Διηλεκτρικής Σταθεράς $f = 1 \text{ GHz}$				
α/α	Λόγος Νερό-Ζελατίνη	Λόγος Νερό-Σιλικόνη	Λόγος Καταλύτη-Σιλικόνης (%)	$\epsilon_r'$
Ημέρα 1 <sup>η</sup>	3,0	2,9	4%	41,8
Ημέρα 2 <sup>η</sup>	3,0	3,1	4%	43,1
Ημέρα 3 <sup>η</sup>	3,0	2,9	5%	42,8

Πίνακας 34: Αναλογίες & τιμή  $\epsilon_r'$  δοκιμίων αναλογίας 3:1 για όλες τις μέρες



Εικόνα 88: Δοκιμαστικά δοκίμια, αναλογίας 3:1, για 3 διαφορετικές μέρες

α/α	3:1 ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ/ΣΙΛΙΚΟΝΗ - ΜΕΙΓΜΑ 2 – ΝΕΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ			
	$\epsilon_r'$	$\epsilon'$ ΜΕΣΗ	Τυπική απόκλιση $\sigma$	Συντελεστής διακύμανσης CV (%)
1η Ημέρα	41,8	42,6	0,6	1,3
2η Ημέρα	43,1			
3η Ημέρα	42,8			

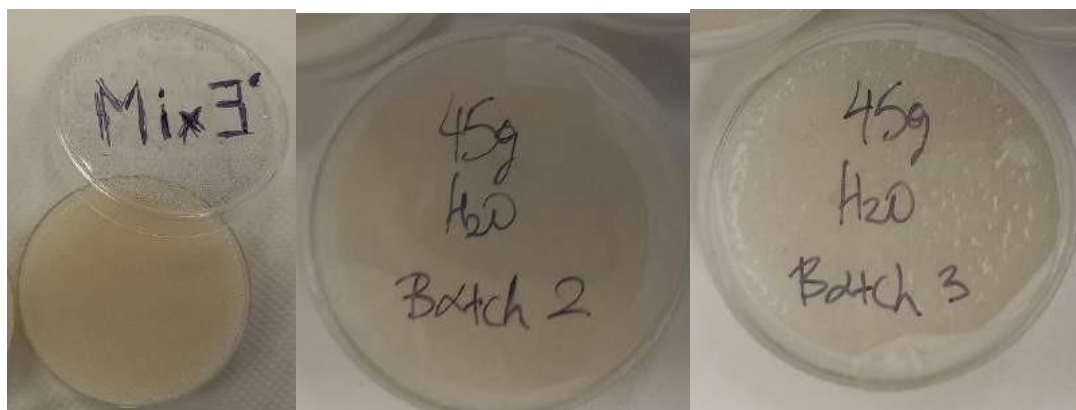
Πίνακας 35: Διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r'$  δοκιμίων αναλογίας 3:1 για το νέο πρωτόκολλο

### Δοκιμαστικό δοκίμιο 4,5:1

Η σειρά δοκιμίων με αναλογία 4,5:1, με βάση το νέο πρωτόκολλο.

Δοκιμαστικό Δοκίμιο 4,5:1 – Αναλογίες Υλικών & $\epsilon_r'$				
Μετρούμενη Συχνότητα Διηλεκτρικής Σταθεράς $f = 1 \text{ GHz}$				
α/α	Λόγος Νερό-Ζελατίνη	Λόγος Νερό-Σιλικόνη	Λόγος Καταλύτη-Σιλικόνης (%)	$\epsilon_r'$
Ημέρα 1 <sup>η</sup>	3,0	4,3	3%	49,3
Ημέρα 2 <sup>η</sup>	3,0	4,6	4%	47,9
Ημέρα 3 <sup>η</sup>	3,0	4,5	4%	48,1

Πίνακας 36: Αναλογίες & τιμή  $\epsilon_r'$  δοκιμίων αναλογίας 4,5:1 για όλες τις μέρες



Εικόνα 89: Δοκιμαστικά δοκίμια, αναλογίας 4,5:1, για 3 διαφορετικές μέρες

α/α	4,5:1 ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ/ΣΙΛΙΚΟΝΗ - ΜΕΙΓΜΑ 3 – ΝΕΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ			
	$\epsilon_r'$	$\epsilon'$ ΜΕΣΗ	Τυπική απόκλιση $\sigma$	Συντελεστής διακύμανσης CV (%)
1η Ημέρα	49,3	48,4	0,6	1,3
2η Ημέρα	47,9			
3η Ημέρα	48,1			

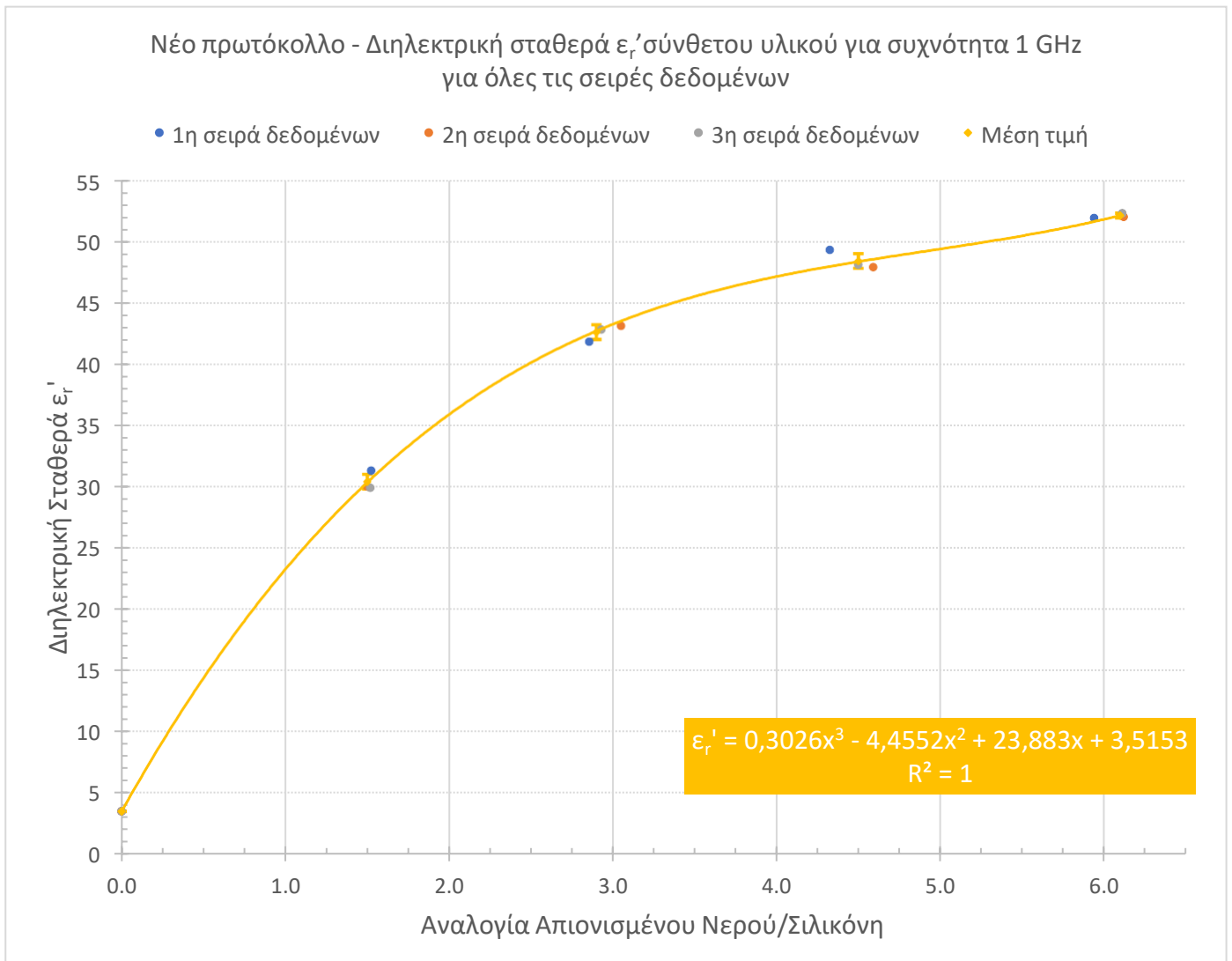
Πίνακας 37: Διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r'$  δοκιμίων αναλογίας 4,5:1 για το νέο πρωτόκολλο

### Συμπεράσματα:

- ✓ Το νέο πρωτόκολλο εμφανίζει επαναληψιμότητα για όλες τις αναλογίες που μελετάμε
- ✓ Ο συντελεστής διακύμανσης CV σε κάθε περίπτωση είναι κάτω του 5%, όπως και επιθυμούσαμε
- ✓ Η τυπική απόκλιση είναι πολύ μικρή και έχει τιμή μικρότερη της μονάδας, δηλαδή οι μετρούμενες τιμές του  $\epsilon'$  για κάθε δοκίμιο είναι κοντά στη μέση τιμή.

- ✓ Δεν αντιμετωπίσαμε πρόβλημα με την ανάμειξη των υλικών
- ✓ Αποδεχόμαστε το νέο αναπτυσσόμενο πρωτόκολλο

Με βάση τα δεδομένα, δημιουργούμε το καινούργιο μαθηματικό μοντέλο.



Διάγραμμα 7: Αποδεκτό μαθηματικό μοντέλο διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r'$  σύνθετου υλικού, με βάση το νέο πρωτόκολλο

Η καμπύλη ξεκινά από την τιμή διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r'$  ίση με 3,5 διότι τόσο μετρήθηκε η καθαρή σιλικόνη. Λαμβάνουμε τις μέσες τιμές των σειρών δεδομένων μας για να επιλέξουμε την εξίσωση του μαθηματικού μοντέλου. Εφόσον, έχουμε πολύ μικρή απόκλιση μεταξύ των τιμών, επιθυμούμε το πολυώνυμο που θα διαλέξουμε να διέρχεται από αυτές. Γενικά, τα σημεία αντιπροσωπεύονται καλύτερα από τη μορφή καμπύλης πολυώνυμου 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> βαθμού. Τα πολυώνυμα μας δίνουν παρόμοια αποτελέσματα για την αναλογία απιονισμένου νερού – σιλικόνης που απαιτείται, για συγκεκριμένη τιμή διηλεκτρικής σταθεράς υλικού. Εμείς διαλέγουμε το πολυώνυμο 3<sup>ου</sup> βαθμού, διότι έχει έναν όρο λιγότερο από αυτό του 4<sup>ου</sup> βαθμού που δεν προσθέτει σημαντική αξία στο τελικό αποτέλεσμα. Ωστόσο, τελικά πιο σημαντικό είναι να παραθέτουμε τις μέσες τιμές με τις γραμμές σφάλματος τους γιατί τότε γνωρίζουμε το εύρος στο οποίο κυμαίνονται οι τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r'$ .

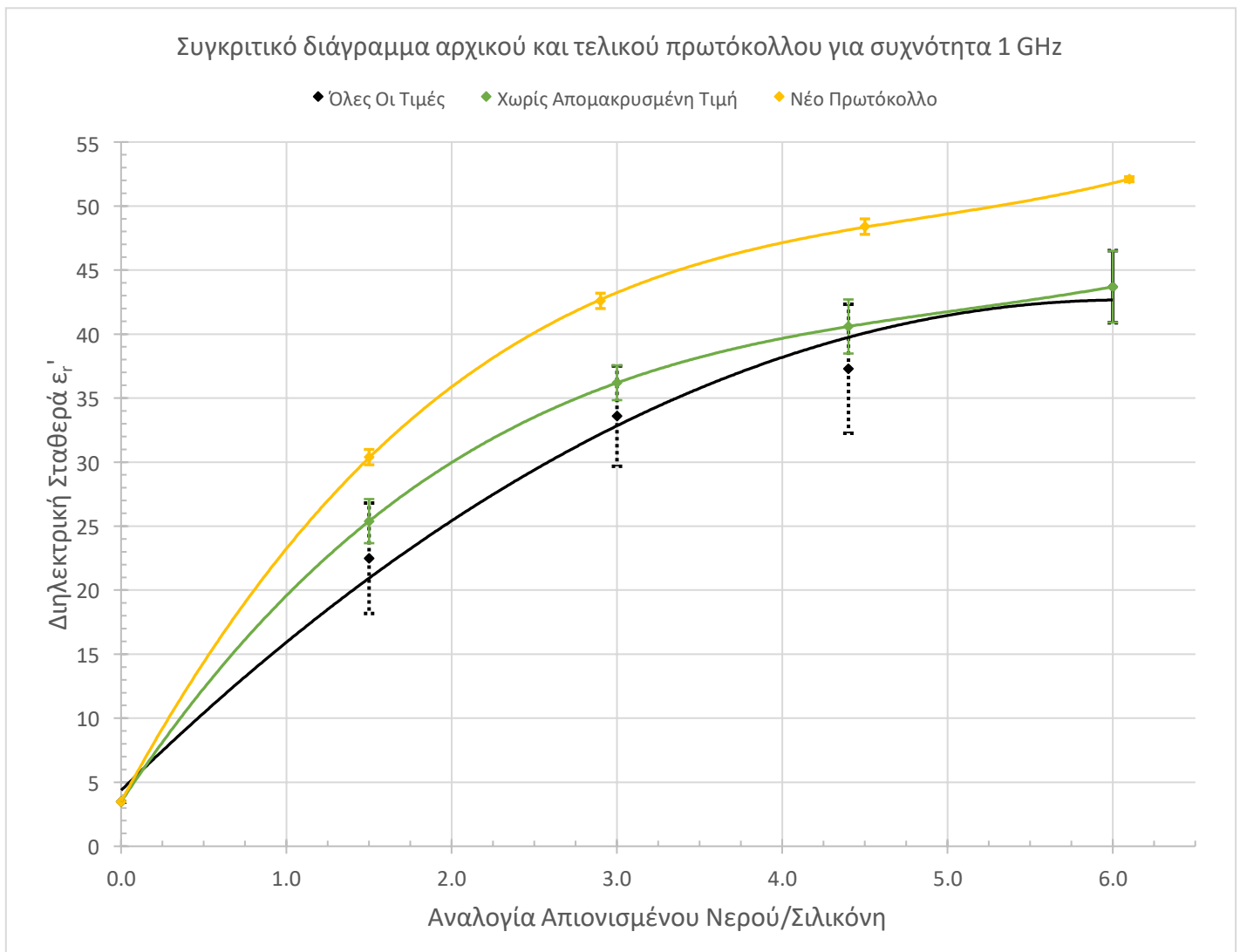
Τιμές αναλογίας απιονισμένου νερού – σιλικόνης (0,0 – 4,0):

Παρατηρούμε ότι η τιμή του  $\epsilon_r'$  αυξάνεται ραγδαία με αύξηση της αναλογίας νερού – σιλικόνης, δηλαδή το απιονισμένο νερό έχει σημαντική επίδραση στο σύνθετο υλικό. Η κλίση της εφαπτομένης της καμπύλης είναι αρχικά μεγάλη και σταδιακά ελαττώνεται. Επομένως, άμα έχουμε τιμή σχεδιασμού  $\epsilon_r'$  μέχρι περίπου 47 τότε είναι αναγκαίο να είμαστε ακριβείς με τις αναλογίες μας.

Τιμές αναλογίας απιονισμένου νερού – σιλικόνης (4,0 – 6,0):

Έχουμε αύξηση της τιμής του  $\epsilon_r'$  αλλά σε μικρό ρυθμό. Οι τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Η ακρίβεια στις αναλογίες μας δεν επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό το τελικό αποτέλεσμα, όπως πριν. Θεωρητικά, όσο αυξάνεται η αναλογία απιονισμένου νερού – σιλικόνης θα καταλήξουμε σε σύνθετο υλικό με ίδια τιμή διηλεκτρικής σταθεράς ίση με αυτή του νερού δηλαδή περίπου  $\epsilon_r' \cong 78,5$ .

Τελικά, παραθέτουμε συγκριτικό διάγραμμα διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r'$ , με βάση τις πειραματικές τιμές του αρχικού και καινούργιου πρωτόκολλου.



Διάγραμμα 8: Σύγκριση αρχικού & τελικού πρωτόκολλου με τις γραμμές σφαλμάτων τους

Αντιλαμβανόμαστε, ότι τα πρωτόκολλα διαφέρουν αξιόλογα μεταξύ τους. Αρχικά, οι γραμμές σφάλματος του νέου πρωτόκολλου μόλις που μπορούν να διακριθούν, ενώ στον αντίποδα οι τιμές του αρχικού πρωτόκολλου έχουν πολύ μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους, ακόμη και μετά την εξάλειψη της απομακρυσμένης τιμής. Με το νέο πρωτόκολλο, επιτυγχάνουμε αυξημένες τιμές  $\epsilon_r'$  για το σύνθετο υλικό, έχοντας ίδια αναλογία νερού – σιλικόνης. Αυτό το οφείλουμε στην καλύτερη απορρόφηση του νερού στο μείγμα και γενικότερα στην καλύτερη ανάδευση κατά την πειραματική διάρκεια. Επίσης, με το καινούργιο πρωτόκολλο έχουμε μεγαλύτερο εύρος τιμών  $\epsilon_r'$ , από το οποίο μπορούμε να επιλέξουμε για να κατασκευάσουμε το σύνθετο υλικό.

### 5.5 Τρισδιάστατη Απεικόνιση Τιμών Διηλεκτρικής Σταθεράς $\epsilon_r'$

Πέρα από την αναλογία απιονισμένου νερού – σιλικόνης και της διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon'$ , έχουμε και δεδομένα για τη συχνότητα. Επομένως, αποφασίζουμε να δημιουργήσουμε μία γραφική απεικόνιση με βάση αυτές τις 3 μεταβλητές. Το τελικό αποτέλεσμα που επιθυμούμε είναι μία τρισδιάστατη επιφάνεια, όπου με βάση τις τιμές της επιθυμητής διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού και της συχνότητας να βρίσκουμε την απαιτούμενη αναλογία νερού – σιλικόνης.

Ενδεικτικά, δείχνουμε τη διαδικασία που ακολουθούμε με βάση τα δεδομένα που έχουμε λάβει από το νέο πρωτόκολλο για το μείγμα 1, αναλογίας 1,5:1.

#### Αναλογία απιονισμένου νερού – σιλικόνης 1,5:1 – Μείγμα 1 – Νέο Πρωτόκολλο

Έχουμε μετρήσεις διηλεκτρικής σταθεράς για συχνότητα από 500 MHz – 3.000 MHz, με βήμα 25 Hz.

Για το δοκίμιο 1<sup>ης</sup> ημέρας, αναλογίας 1,5:1 έχουμε ότι :

1,5:1 ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ/ΣΙΛΙΚΟΝΗ – ΔΟΚΙΜΙΟ ΗΜΕΡΑΣ 1 – ΝΕΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ		
f (MHz)	$\epsilon_r'$	Λόγος Νερό-Σιλικόνη
500	32,7	1,5
525	32,6	
550	32,5	
575	32,5	
600	32,4	
...	...	
2900	30,6	
2925	30,6	
2950	30,6	
2975	30,7	
3000	30,7	

Πίνακας 38: Τιμές διηλεκτρικής σταθεράς ανά 25 MHz για αναλογία απιονισμένου νερού – σιλικόνης ίση με 1,5 (1<sup>η</sup> σειρά δοκιμίου – νέο πρωτόκολλο)

Γενικά, η τιμή του  $\epsilon'$  μεταβάλλεται στο εύρος της μετρούμενης συχνότητας. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα και των άλλων 2 ημερών, λαμβάνουμε το μέσο όρο της τιμής της διηλεκτρικής σταθεράς.

1,5:1 ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ/ΣΙΛΙΚΟΝΗ – ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ – ΝΕΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ		
f (MHz)	ε'ΜΕΣΗ	Λόγος Νερό-Σιλικόνη
500	32,0	1,5
525	31,9	
550	31,9	
575	31,8	
600	31,8	
...	...	
2900	29,9	
2925	29,9	
2950	29,9	
2975	29,9	
3000	29,9	

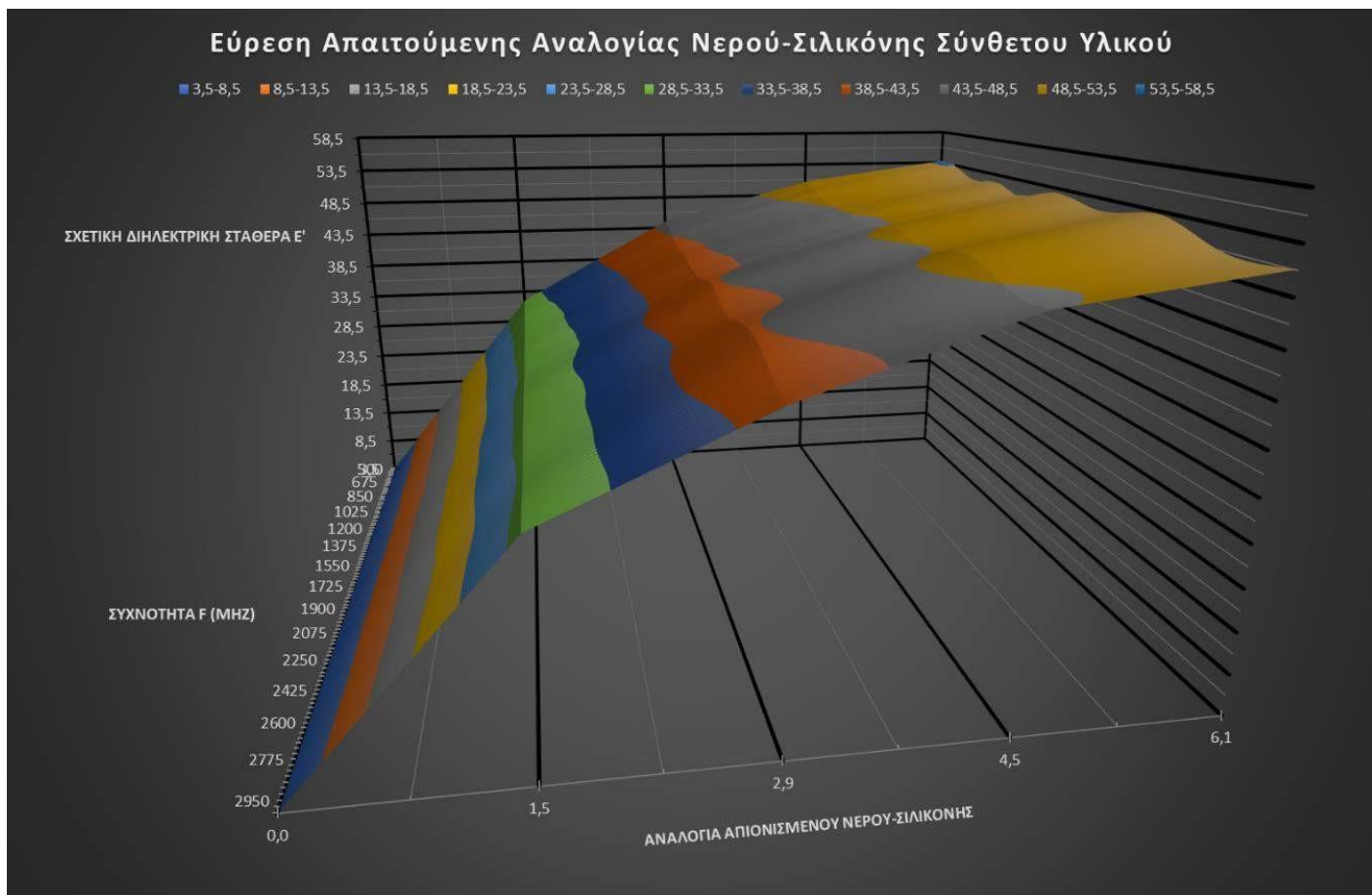
Πίνακας 39: Μέση τιμή διηλεκτρικής σταθεράς ανά 25 MHz για αναλογία απιονισμένου νερού – σιλικόνης ίση με 1,5 (χρήση 3 σειρών δεδομένων – νέο πρωτόκολλο)

Ύστερα, υπολογίζουμε τη τυπική απόκλιση  $\sigma$  και τον συντελεστή διακύμανσης CV. Θέτουμε λογική συνθήκη για τα δεδομένα της στήλης CV, όπου άμα η τιμή είναι μικρότερη του 5, να εμφανίζει τη λέξη TRUE, σε διαφορετική περίπτωση θα εμφανίζει τη λέξη FALSE.

1,5:1 ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ/ΣΙΛΙΚΟΝΗ - ΔΟΚΙΜΙΟ ΗΜΕΡΑΣ 1 – ΝΕΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ			
f(MHz)	Τυπική απόκλιση $\sigma$	Συντελεστής διακύμανσης CV (%)	TRUE/FALSE
500	0,5	1,5	TRUE
525	0,5	1,4	TRUE
550	0,4	1,4	TRUE
575	0,4	1,4	TRUE
600	0,5	1,4	TRUE
...	...	...	...
2900	0,5	1,7	TRUE
2925	0,5	1,8	TRUE
2950	0,5	1,8	TRUE
2975	0,5	1,8	TRUE
3000	0,5	1,8	TRUE

Πίνακας 40: Υπολογισμός υπόλοιπων χρήσιμων στατιστικών εννοιών ανά 25 MHz για αναλογία απιονισμένου νερού – σιλικόνης ίση με 1,5 και έλεγχος αν  $CV < 5\%$ . (χρήση 3 σειρών δεδομένων – νέο πρωτόκολλο)

Παρατηρούμε ότι για όλες τις συχνότητες f, επαληθεύεται η συνθήκη TRUE δηλαδή η τιμή του CV δεν ξεπερνά το 5%. Πραγματοποιώντας την ίδια προσέγγιση για τις υπόλοιπες αναλογίες νερού – σιλικόνης, δεν αντιμετωπίζουμε κάποιο πρόβλημα με την τιμή CV, κάτι το οποίο δίνει περισσότερη ισχύ στο αναπτυσσόμενο πρωτόκολλο. Τελικά, παράγουμε το παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 9: Τρισδιάστατη επιφάνεια για την εύρεση ιδιοτήτων σύνθετου υλικού

Το διάγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βρούμε την απαραίτητη αναλογία απιονισμένου νερού – σιλικόνης, με την οποία πρέπει να παραχθεί το σύνθετο υλικό, όταν μας ζητείται αναλυτική τιμή στόχου για την παράμετρο της διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon'$  για δεδομένη συχνότητα  $f$  μέτρησης.

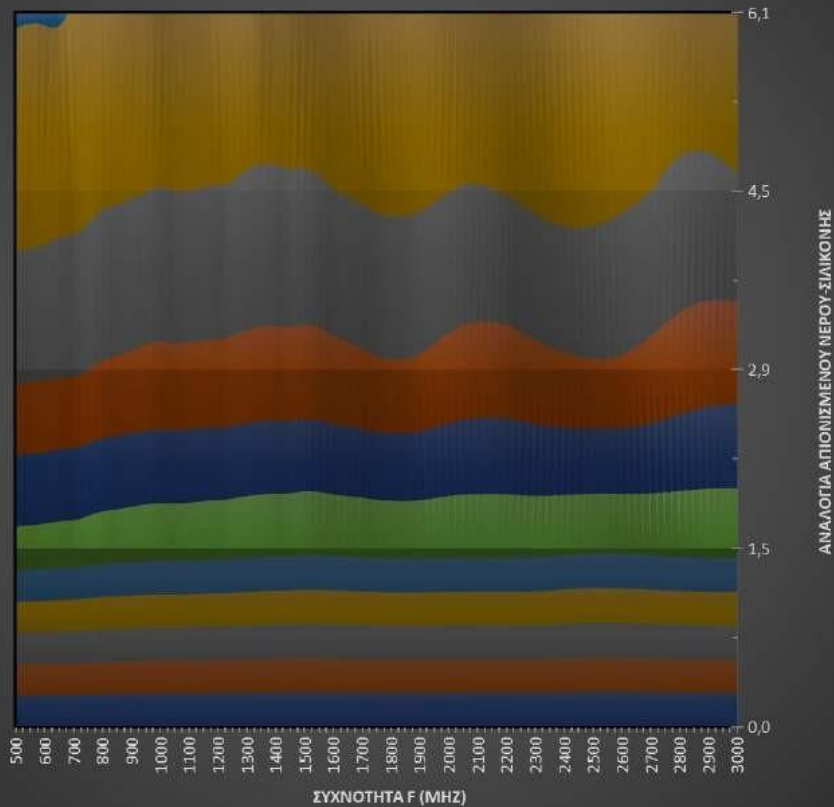
Τα χρώματα της επιφάνειας ορίζουν το εύρος της διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon'$ . Το κάθε χρώμα αντιπροσωπεύει εύρος διηλεκτρικής σταθεράς ίσο με 5. Για παράδειγμα, το κεραμιδί χρώμα έχει εύρος  $\epsilon' = 38,5 - 43,5$ , το γκρι αναφέρεται σε εύρος για τιμή  $\epsilon' = 43,5 - 48,5$  κλπ. Βλέπουμε ότι για την επίτευξη μικρών σχετικά τιμών  $\epsilon'$  (διάστημα 3,5 – 28,5), το πλάτος της απαιτούμενης αναλογίας απιονισμένου νερού – σιλικόνης είναι μικρό και συγκεκριμένο, οπότε απαιτείται η κατάλληλη ακρίβεια εκ μέρους μας. Αυτές οι χρωματιστές περιοχές, έχουν μορφή ορθογώνιου παραλληλόγραμμου. Για τιμές  $\epsilon'$  μεγαλύτερες του 28,5, το πλάτος των περιοχών, όσον αφορά την αναλογία, ξεκινά αργά να εκτείνεται. Το σχήμα αυτών τροποποιείται από ορθογώνιο παραλληλόγραμμο σε μια περισσότερο πολύπλοκη μορφή.

Επιπλέον, παρατηρούμε ότι γενικά με την αλλαγή της συχνότητας  $f$  προκύπτουν μικρές μεταβολές σχετικά με την απαιτούμενη αναλογία για την παραγωγή του σύνθετου υλικού, με δεδομένη τιμή στόχου σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon'$ . Μόνο από την κεραμιδί επιφάνεια και μετά, αρχίζει να είναι αισθητός παράγοντας. Για παράδειγμα, για συχνότητα  $f = 500$  MHz και τιμή στόχο  $\epsilon' = 43,5 - 48,5$ , η απαιτούμενη αναλογία είναι περίπου 2,9 ενώ όσο αυξάνεται η συχνότητα για την ίδια τιμή  $\epsilon'$ , είναι αναγκαίο να μεταβληθεί αρκετά η αναλογία νερού – σιλικόνης. Για συχνότητα  $f = 2.900$  MHz, απαιτείται αναλογία περίπου 3,5. Συγκρίνοντας τις 2 τιμές, έχουμε διαφορά αναλογίας 0,6 μονάδες.



## Εύρεση Απαιτούμενης Αναλογίας Νερού-Σιλικόνης Σύνθετου Υλικού

■ 3,5-8,5 ■ 8,5-13,5 ■ 13,5-18,5 ■ 18,5-23,5 ■ 23,5-28,5 ■ 28,5-33,5 ■ 33,5-38,5 ■ 38,5-43,5 ■ 43,5-48,5 ■ 48,5-53,5 ■ 53,5-58,5



Διάγραμμα 10: Κάτωση τρισδιάστατης επιφάνειας

### 5.6 Εφαρμογές

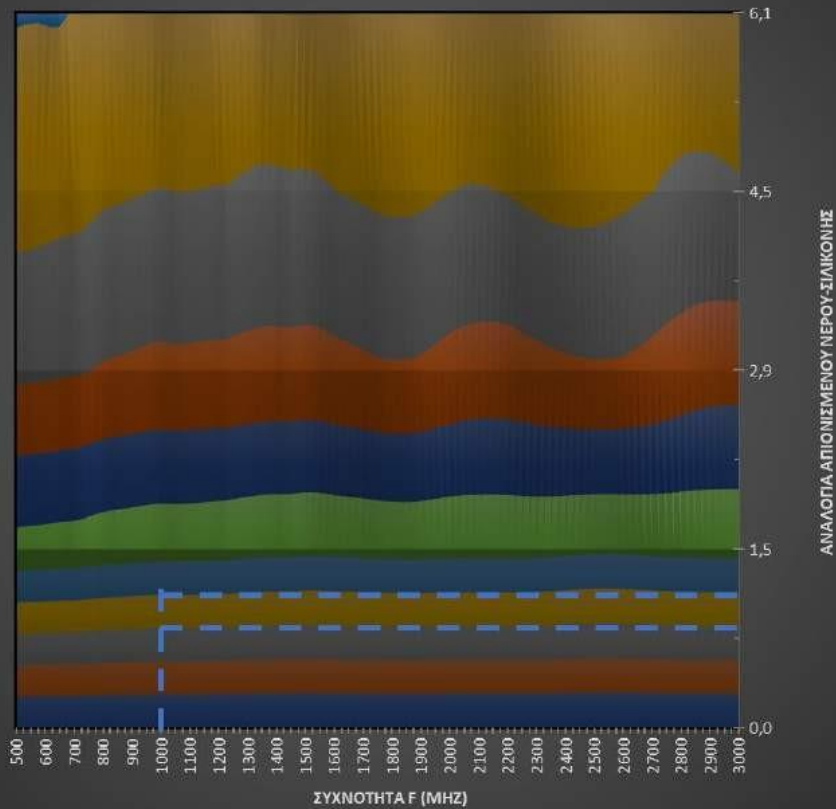
Κατόπιν της ανάπτυξης καινούργιου πρωτόκολλου κατασκευής σύνθετου υλικού, μαθηματικού μοντέλου και της τρισδιάστατης επιφάνειας για την εύρεση απαιτούμενης αναλογίας απιονισμένου νερού και σιλικόνης, περνάμε στο τελικό στάδιο για την ολοκλήρωση της μελέτης μας. Εδώ, θέτουμε 2 τιμές στόχους για την διηλεκτρική σταθερά υλικού για μετρούμενη συχνότητα 1 GHz. Η 1<sup>η</sup> τιμή στόχος ισούται με  $\epsilon'_{TARGET 1} = 20$  και μετά με αυτό το υλικό θα εμβαπτίσουμε σε μία κεραία. Η επιλογή αυτής της τιμής δεν έχει κάποιο ορισμένο στόχο, απλώς επιλέγεται για να δείξουμε ότι μπορούμε να φτιάξουμε υλικό με δεδομένη τιμή  $\epsilon'$ . Η 2<sup>η</sup> τιμή στόχος επιλέγεται ίση με  $\epsilon'_{TARGET 2} = 42$  και θα δημιουργήσουμε ένα καλούπι ανθρώπινου κεφαλιού (head phantom). Όπως έχουμε αναφέρει στη βασική βιβλιογραφία, ένα επιστημονικό άρθρο συνιστά ότι, η μέση τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς του ανθρώπινου εγκεφάλου  $\epsilon'_{AVERAGE HUMAN BRAIN}$  ισούται με 42.

*Τιμή διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon'_{TARGET 1} = 20$  (κεραία)*

Αρχικά, συμβουλευόμαστε την επιφάνεια που δημιουργήσαμε στο κεφάλαιο 5.5, για να δούμε το διάστημα αναλογίας νερού – σιλικόνης που μας ενδιαφέρει, με μία πρώτη ματιά. Η συχνότητα που μας ενδιαφέρει είναι  $f = 1$  GHz και η διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon'_{TARGET 1} = 20$ , οπότε χρειαζόμαστε αναλογία νερού – σιλικόνης ανάμεσα στο 0,8 – 1,0.

## Εύρεση Απαιτούμενης Αναλογίας Νερού-Σιλικόνης Σύνθετου Υλικού

■ 3,5-8,5 ■ 8,5-13,5 ■ 13,5-18,5 ■ 18,5-23,5 ■ 23,5-28,5 ■ 28,5-33,5 ■ 33,5-38,5 ■ 38,5-43,5 ■ 43,5-48,5 ■ 48,5-53,5 ■ 53,5-58,5



Εικόνα 90: Εύρος απαιτούμενης αναλογίας νερού – σιλικόνης σύνθετου υλικού με διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon'_{TARGET 1} = 20$

Για την ακριβή τιμή, κάνουμε χρήση του μαθηματικού μοντέλου του νέου πρωτόκολλου  $\epsilon' = 0,3026x^3 - 4,4552x^2 + 23,883x + 3,5153$ , όπου  $x$ : η απαιτούμενη αναλογία νερού – σιλικόνης. Σε αυτό το σημείο, έχουμε 2 επιλογές για την επίλυση της εξίσωσης, είτε κάνουμε χρήση μίας αριθμητικής μεθόδου είτε μέσω της γραφικής παράστασης της συνάρτησης. Επιλέγουμε να δείξουμε και τις 2 διαδρομές.

### Αριθμητική μέθοδος (Μέθοδος διχοτόμησης)

Για την επίλυση της μη γραμμικής εξίσωσης, διαλέγουμε την αριθμητική μέθοδο της διχοτόμησης λόγω της απλότητας της. Δεχόμαστε ότι η λύση της εξίσωσης, θα έχει ακρίβεια 1 δεκαδικού ψηφίου. Η τιμή στόχος ισούται με  $\epsilon'_{TARGET 1} = 20$ . Άρα, η εξίσωση μας παραλαμβάνει τη μορφή :

$$20 = 0,3026x^3 - 4,4552x^2 + 23,883x + 3,5153$$

$$0,3026x^3 - 4,4552x^2 + 23,883x - 16,4847 = 0$$

$$\text{Ορίζουμε τη συνάρτηση } f(x) = 0,3026x^3 - 4,4552x^2 + 23,883x - 16,4847$$

Αναφέρουμε ότι :

- Το αρχικό διάστημα μελέτης μας, λαμβάνεται με τη βοήθεια της τρισδιάστατης επιφάνειας. Όπως, έχουμε αναφέρει προηγουμένως η αναλογία νερού – σιλικόνης είναι στο διάστημα  $[0,8 - 1,0]$ .

- Η εξίσωση  $f(x) = 0,3026 \cdot x^3 - 4,4552 \cdot x^2 + 23,883 \cdot x - 16,4847$  είναι συνεχής στο διάστημα μελέτης ως πολυωνυμική.
- $f(0,8) = 0,3026 \cdot (0,8)^3 - 4,4552 \cdot (0,8)^2 + 23,883 \cdot 0,8 - 16,4847 = -0,01 < 0$
- $f(1,0) = 0,3026 \cdot (1,0)^3 - 4,4552 \cdot (1,0)^2 + 23,883 \cdot 1,0 - 16,4847 = +3,25 > 0$
- Εφόσον,  $f(0,8) \cdot f(1,0) < 0$  τότε υπάρχει τουλάχιστον μία ρίζα στο διάστημα μελέτης  $(0,8 - 1,0)$ .

Είναι προφανές ότι η τιμή 0,8 είναι η αναλογία απιονισμένου νερού - σιλικόνης που ζητάμε. Ωστόσο, δείχνουμε και τη μέθοδο:

### 1<sup>η</sup> Επανάληψη

Έχουμε αρχικό διάστημα το  $I_1 = (0,8 - 1,0)$ . Βρίσκουμε το μέσον του.

$$m_1 = \frac{0,8+1,0}{2} = 0,9$$

Υπολογίζουμε το πρόσημο για την τιμή μας.

$$f(0,9) = 0,3026 \cdot (0,9)^3 - 4,4552 \cdot (0,9)^2 + 23,883 \cdot 0,9 - 16,4847 = +1,62 > 0$$

Αφού,  $f(0,8) \cdot f(0,9) < 0$  τότε το νέο διάστημα μελέτης είναι το  $I_2 = (0,8 - 0,9)$ .

### 2<sup>η</sup> Επανάληψη

Έχουμε αρχικό διάστημα το  $I_2 = (0,8 - 0,9)$ . Βρίσκουμε το μέσον του.

$$m_2 = \frac{0,8+0,9}{2} = 0,85$$

Υπολογίζουμε το πρόσημο για την τιμή μας.

$$f(0,85) = 0,3026 \cdot (0,85)^3 - 4,4552 \cdot (0,85)^2 + 23,883 \cdot 0,85 - 16,4847 = +0,78 > 0$$

Αφού,  $f(0,8) \cdot f(0,85) < 0$  τότε το νέο διάστημα μελέτης είναι το  $I_3 = (0,8 - 0,85)$ .

Επειδή, επιθυμούμε λύση με ακρίβεια 1 δεκαδικού ψηφίου, καταλήγουμε ότι το μείγμα που θα δημιουργήσουμε για το σύνθετο υλικό ισούται με 0,8.

Για να αποδείξουμε ότι η λύση (τιμή αναλογίας) είναι μοναδική, μελετάμε την μονοτονία της συνάρτησης  $f(x)$ , με τη βοήθεια της παραγώγου  $f'(x)$ .

$$f'(x) = (0,3026x^3 - 4,4552x^2 + 23,883x - 16,4847)' = 0,9078x^2 - 8,9104x + 23,883$$

Το πρόσημο της  $f'(x)$  καθορίζει αν η  $f(x)$  είναι γνησίως αύξουσα ή φθίνουσα και για ποιες τιμές του  $x$  (αναλογία απιονισμένου νερού - σιλικόνης).

$$\text{Η διακρίνουσα της } f'(x) \text{ ισούται με : } \Delta = \beta^2 - 4\alpha\gamma = (-8,9104)^2 - 4 \cdot (0,9078 \cdot 23,883) = 79,4 - 86,7 < 0.$$

Όταν η διακρίνουσα  $\Delta < 0$ , τότε σημαίνει ότι η εξίσωση δεν έχει λύσεις για  $f'(x) = 0$ , οπότε διατηρεί το πρόσημο της για κάθε πραγματική τιμή του  $x$ .

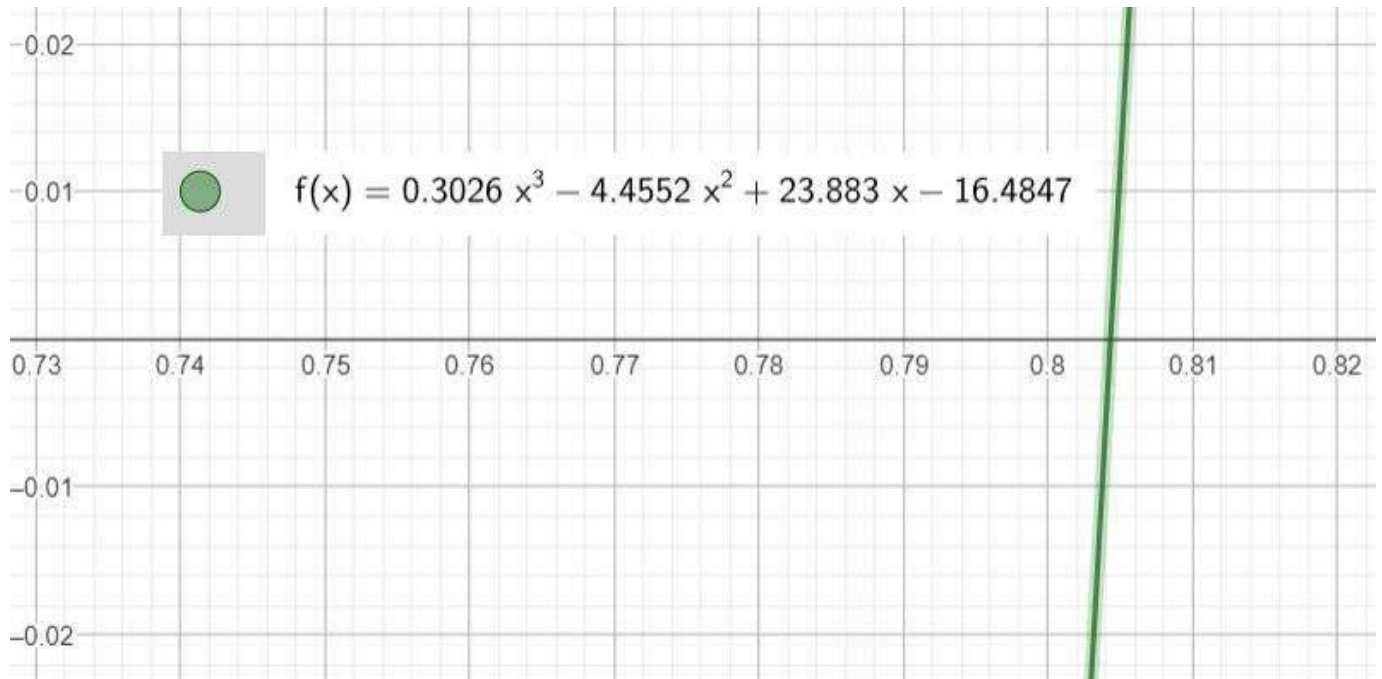
$$\text{Έστω } x = 0, \text{ τότε } f'(0) = 0,9078 \cdot (0)^2 - 8,9104 \cdot (0) + 23,883 = 23,883 > 0$$

Άρα, εφόσον  $f'(x) > 0$ , για κάθε τιμή του  $x$  τότε η  $f(x)$  διατηρεί τη μονοτονία της (γνησίως αύξουσα) στο διάστημα που μελετάμε  $(0,8 - 1,0)$ . Άρα, η επιλεγόμενη αναλογία απιονισμένου νερού - σιλικόνης 0,8 είναι και η μοναδική λύση.

### Γραφική παράσταση συνάρτησης

Αναζητούμε στο διαδίκτυο ένα δωρεάν ψηφιακό εργαλείο που παράγει γραφικές παραστάσεις συναρτήσεων. Επιλέγουμε την ιστοσελίδα [GeoGebra.org](http://GeoGebra.org), όπου

συντάσσουμε την εξίσωση μας  $f(x) = 0,3026 \cdot x^3 - 4,4552 \cdot x^2 + 23,883 \cdot x - 16,4847$  και παρατηρούμε που τέμνει τον άξονα  $x \cdot x$  για να λάβουμε την τιμή της αναλογίας.



Εικόνα 91: Τομή εξίσωσης μαθηματικού μοντέλου καινούργιου πρωτόκολλου με τον άξονα  $x \cdot x$  για τιμή  $f(x) = \varepsilon'_{TARGET 1} = 20$

Η λύση της εξίσωσης  $f(x) = 0$  είναι ανάμεσα στο  $0,8 - 0,81$ . Για ακρίβεια 1 δεκαδικού ψηφίου, είναι προφανές ότι θέλουμε αναλογία απιονισμένου νερού – σιλικόνης ίση με 0,8.

Συμπεραίνουμε, ότι και οι 2 μέθοδοι που εκμεταλλευτήκαμε προσεγγίσαμε την ίδια τιμή. Το μόνο που μένει είναι να δούμε αν το δοκίμιο που θα κατασκευάσουμε θα έχει την τιμή στόχο  $\varepsilon'_{TARGET 1}$ .

#### Δοκίμιο κεραίας

Δοκίμιο Κεραίας 0,8:1 – Αναλογίες Σύνθετου υλικού & $\varepsilon_r$				
Μετρούμενη Συχνότητα Διηλεκτρικής Σταθεράς $f = 1$ GHz				
a/a	Λόγος Νερό-Ζελατίνη	Λόγος Νερό-Σιλικόνη	Λόγος Καταλύτη-Σιλικόνης (%)	$\varepsilon_r'$
Κεραία	3,0	0,8	3%	21,0
Τιμή στόχος $\varepsilon'_{TARGET 1}$	20,0			

Πίνακας 41: Τελική τιμή  $\varepsilon_r'$  διηλεκτρικής στρώσης κεραίας συγκριτικά με την τιμή στόχο  $\varepsilon'_{TARGET 1}$



Εικόνα 92: Δοκίμιο με τιμή στόχου  $\epsilon'_{\text{TARGET 1}}$

Προκύπτει ότι η μετρούμενη τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς ισούται με  $\epsilon'_{\text{ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ 1}} = 21,0$ , η οποία είναι πολύ κοντά στην τιμή στόχος και την αποδεχόμαστε.

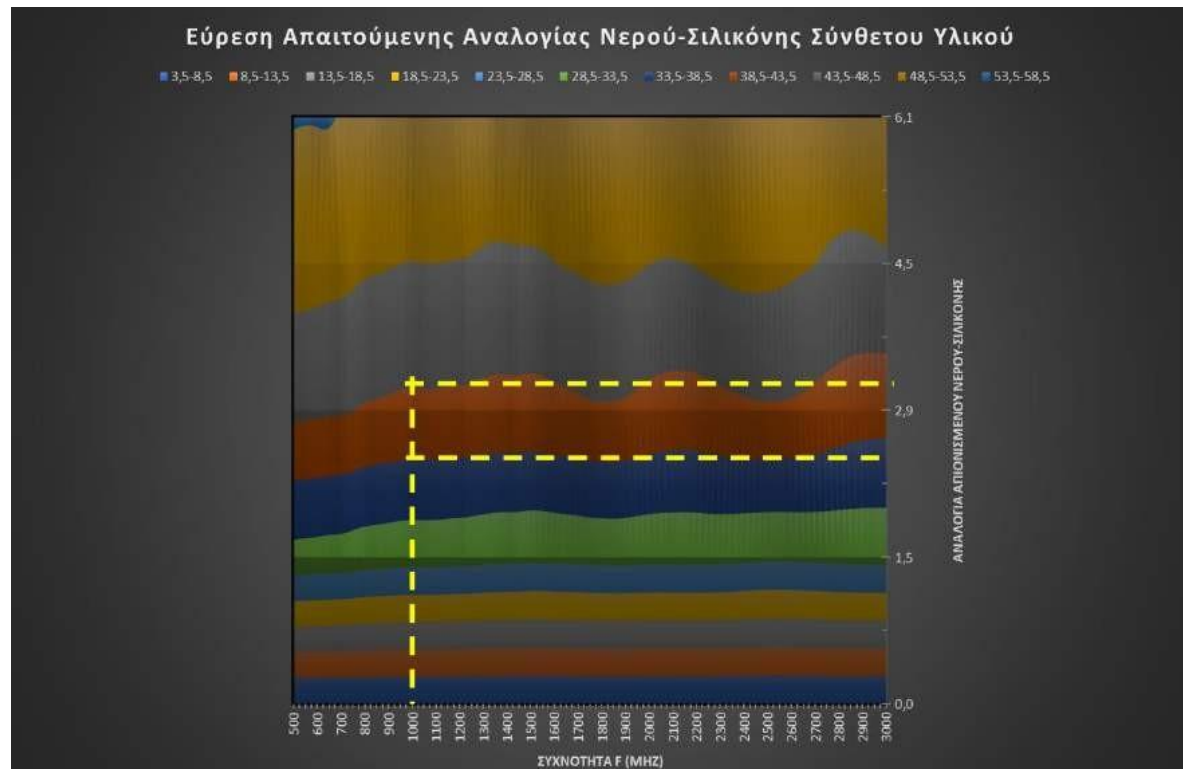
Τελικά, κάνουμε χρήση του ήδη υπάρχοντος καλουπιού και εγχύνουμε το σύνθετο υλικό μας στην κεραία.



Εικόνα 93: Διαστρωμάτωση κεραίας στο σύνθετο υλικό

Τιμή διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon'_{TARGET 2} = 42$  (ανθρώπινος εγκέφαλος)

Κατά αντιστοιχία, πραγματοποιούμε την ίδια διαδικασία απλά αλλάζει η τιμή στόχος της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς. Για συχνότητα  $f = 1$  GHz και σχετική διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon'_{TARGET 2} = 42$ , βλέπουμε ότι η αναλογία νερού – σιλικόνης βρίσκεται στα όρια 2,4 – 3,3.



Εικόνα 94: Εύρος απαιτούμενης αναλογίας νερού – σιλικόνης σύνθετου υλικού με διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon'_{TARGET 2} = 42$

Δείχνουμε τους 2 τρόπους επίλυσης, για την εύρεση της κατάλληλης αναλογίας απιονισμένου νερού - σιλικόνης.

Αριθμητική μέθοδος (Μέθοδος διχοτόμησης)

Δεχόμαστε ότι η λύση της εξίσωσης, θα έχει ακρίβεια 1 δεκαδικού ψηφίου. Η τιμή στόχος ισούται με  $\epsilon'_{TARGET 2} = 42$ . Άρα, η εξίσωση μας παραλαμβάνει τη μορφή :

$$42 = 0,3026x^3 - 4,4552x^2 + 23,883x + 3,5153$$

$$0,3026x^3 - 4,4552x^2 + 23,883x - 38,4847 = 0$$

Ορίζουμε τη συνάρτηση  $g(x) = 0,3026x^3 - 4,4552x^2 + 23,883x - 38,4847$

Αναφέρουμε ότι :

- Το αρχικό διάστημα μελέτης μας, λαμβάνεται με τη βοήθεια της τρισδιάστατης επιφάνειας. Όπως, έχουμε αναφέρει προηγουμένως η αναλογία νερού – σιλικόνης είναι στο διάστημα [2,4 – 3,3].
- Η εξίσωση  $g(x) = 0,3026x^3 - 4,4552x^2 + 23,883x - 38,4847$  είναι συνεχής στο διάστημα μελέτης ως πολυωνυμική.
- $g(2,4) = 0,3026(2,4)^3 - 4,4552(2,4)^2 + 23,883 \cdot 2,4 - 38,4847 = -2,64 < 0$
- $g(3,3) = 0,3026(3,3)^3 - 4,4552(3,3)^2 + 23,883 \cdot 3,3 - 38,4847 = +2,69 > 0$

- Εφόσον,  $g(2,4) \cdot g(3,3) < 0$  τότε υπάρχει τουλάχιστον μία ρίζα στο διάστημα μελέτης  $(2,4 - 3,3)$ .

### 1<sup>η</sup> Επανάληψη

Έχουμε αρχικό διάστημα το  $I_1 = (2,4 - 3,3)$ . Βρίσκουμε το μέσον του.

$$m'_1 = \frac{2,4+3,3}{2} = 2,85$$

Υπολογίζουμε το πρόσημο για την τιμή μας.

$$g(2,85) = 0,3026 \cdot (2,85)^3 - 4,4552 \cdot (2,85)^2 + 23,883 \cdot 2,85 - 38,4847 = + 0,40 > 0$$

Αφού,  $g(2,4) \cdot g(2,85) < 0$  τότε το νέο διάστημα μελέτης είναι το  $I_2 = (2,4 - 2,85)$ .

### 2<sup>η</sup> Επανάληψη

Έχουμε αρχικό διάστημα το  $I_2 = (2,4 - 2,85)$ . Βρίσκουμε το μέσον του.

$$m'_2 = \frac{2,4+2,85}{2} = 2,63$$

Υπολογίζουμε το πρόσημο για την τιμή μας.

$$g(2,63) = 0,3026 \cdot (2,63)^3 - 4,4552 \cdot (2,63)^2 + 23,883 \cdot 2,63 - 38,4847 = - 0,98 < 0$$

Αφού,  $g(2,63) \cdot g(2,85) < 0$ , τότε το νέο διάστημα μελέτης είναι το  $I_3 = (2,63 - 2,85)$ .

### 3<sup>η</sup> Επανάληψη

Έχουμε αρχικό διάστημα το  $I_3 = (2,63 - 2,85)$ . Βρίσκουμε το μέσον του.

$$m'_3 = \frac{2,63+2,85}{2} = 2,74$$

Υπολογίζουμε το πρόσημο για την τιμή μας.

$$g(2,74) = 0,3026 \cdot (2,74)^3 - 4,4552 \cdot (2,74)^2 + 23,883 \cdot 2,74 - 38,4847 = - 0,27 < 0$$

Αφού,  $g(2,74) \cdot g(2,85) < 0$ , τότε το τελικό διάστημα μελέτης είναι το  $I_4 = (2,74 - 2,85)$ . Σε αυτό, υπάρχει μόνο ένας αριθμός με ακρίβεια 1 δεκαδικού ψηφίου. Άρα, η απαιτούμενη αναλογία απιονισμένου νερού – σιλικόνης ισούται με 2,8. Η λύση αυτή είναι μοναδική καθώς η  $g(x)$  διατηρεί τη μονοτονία της στο μελετώμενο διάστημα  $(2,4 - 3,3)$ .

### Γραφική παράσταση συνάρτησης

Σημειώνουμε την εξίσωση μας  $g(x) = 0,3026 \cdot x^3 - 4,4552 \cdot x^2 + 23,883 \cdot x - 38,4847$ , παρατηρούμε που τέμνεται ο άξονας  $x$ ' $x$  και δεχόμαστε αυτή την τιμή ως την αναγκαία αναλογία νερού – σιλικόνης.



Εικόνα 95: Τομή εξίσωσης μαθηματικού μοντέλου καινούργιου πρωτόκολλου με τον άξονα x'x για τιμή  $f(x) = \varepsilon'_{\text{TARGET 2}} = 42$

Η λύση της εξίσωσης  $g(x) = 0$ , που ψάχνουμε είναι ανάμεσα στο 2,78 – 2,79. Για ακρίβεια 1 δεκαδικού ψηφίου, η αναλογίας μας είναι ίση με 2,8.

Οι μέθοδοι επαληθεύουν η μία την άλλη και μπορούμε να συνεχίσουμε. Κατασκευάζουμε το δοκίμιο με την τιμή στόχο  $\varepsilon'_{\text{TARGET 2}}$ .

Δοκίμιο ανθρώπινου εγκεφάλου

Δοκίμιο Εγκεφάλου 2,8:1 – Αναλογίες Σύνθετου υλικού & $\varepsilon_r$				
Μετρούμενη Συχνότητα Διηλεκτρικής Σταθεράς $f = 1 \text{ GHz}$				
α/α	Λόγος Νερό-Ζελατίνη	Λόγος Νερό-Σιλικόνη	Λόγος Καταλύτη-Σιλικόνης (%)	$\varepsilon'$
Δοκίμιο εγκεφάλου	3,0	2,8	4%	41,6
Τιμή στόχος $\varepsilon'_{\text{TARGET 2}}$	42,0			

Πίνακας 42: Τελική τιμή  $\varepsilon_r$  δοκιμίου ανθρώπινου εγκεφάλου συγκριτικά με την τιμή στόχο  $\varepsilon'_{\text{TARGET 2}}$

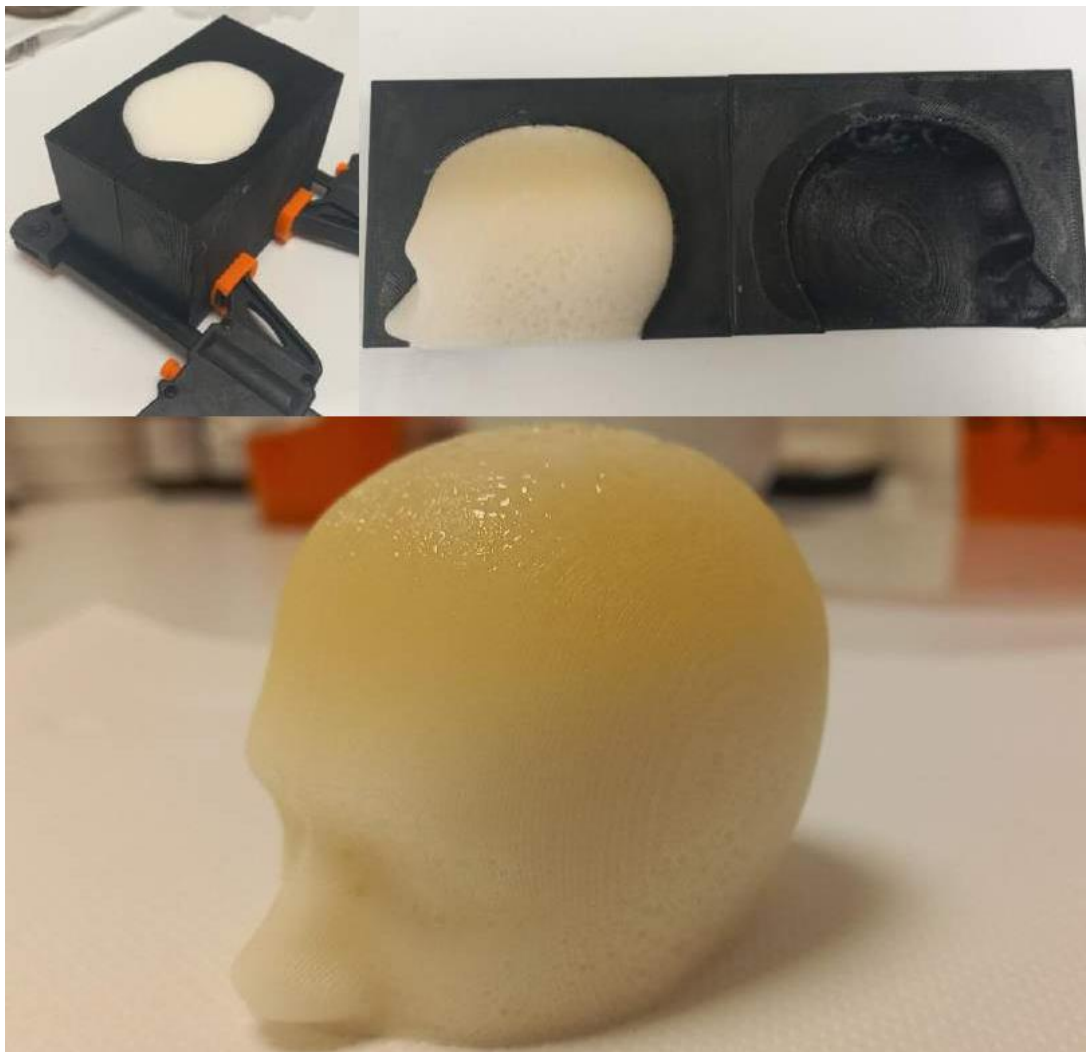




Εικόνα 96: Δοκίμιο με τιμή στόχο  $\epsilon'$ TARGET 2

Η μετρούμενη τιμή της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς για αυτό το δοκίμιο ισούται με  $\epsilon'$ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ 2 = 41,6 και την αποδεχόμαστε.

Τελικά, κάνουμε χρήση του ήδη υπάρχοντος καλουπιού και εγχύνουμε το σύνθετο υλικό σε αυτό.



Εικόνα 97: Καλούπι ανθρώπινου κεφαλιού με τιμή στόχο  $\epsilon'$ TARGET 2

## 5.6 Διάρκεια Ζωής Δοκιμίων

Σε αυτό το υποκεφάλαιο, θα κάνουμε μία μικρή αναφορά για τη διάρκεια ζωής των δοκιμίων. Εξετάζουμε τα δοκίμια της 1<sup>ης</sup>, 2<sup>ης</sup> & 3<sup>ης</sup> σειράς που κατασκευάσαμε με το αρχικό πρωτόκολλο και η ημέρα κατασκευής θεωρείται ως ημέρα 0. Καταγράφουμε την ημέρα κατασκευής και ελέγχουμε τη φυσική τους υπόσταση περίπου κάθε 7 ημέρες από αυτήν. Παράλληλα, καταγράφουμε την τιμή του ε' κάθε δοκιμίου, για να δούμε τη συμπεριφορά τους, ωστόσο το κύριο ενδιαφέρον μας είναι να δούμε το χρονικό διάστημα που αντέχουν τα δοκίμια.

Θεωρούμε ότι τα δοκίμια αποσύρονται, όταν εμφανίζονται εμφανή σημεία μούχλας σε αυτά. Όλα τα δοκίμια συντηρούνται σε ψυγείο, όπου η θερμοκρασία του μετρήθηκε ίση με 10,5°C. Θα προβάλουμε ενδεικτικές φωτογραφίες για την 1<sup>η</sup> σειρά δοκιμίων.

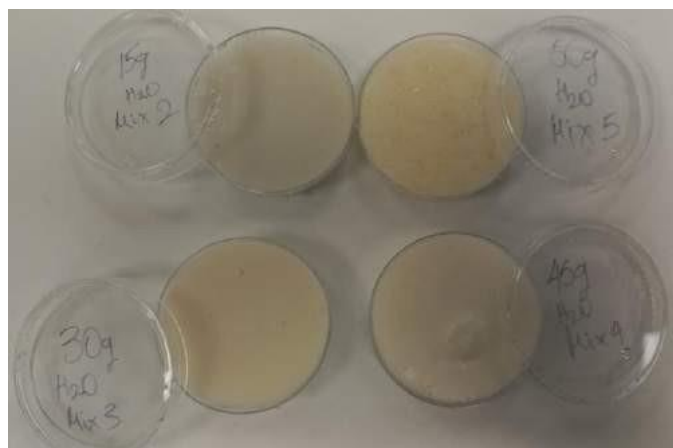
### 1<sup>η</sup> Σειρά Δοκιμίων

Η μέρα κατασκευής είναι των δοκιμίων είναι η Τρίτη 28 Μαρτίου 2023 και η 1<sup>η</sup> μέτρηση καταγράφεται την επόμενη 29/03/2023. Τα δοκίμια έχουν μόλις παραχθεί και έχουν έντονο χρωματισμό. Το mix 2 έχει γκρι απόχρωση, τα mix 3 & 4 λευκό και το mix 5 κιτρινωπό χρώμα.



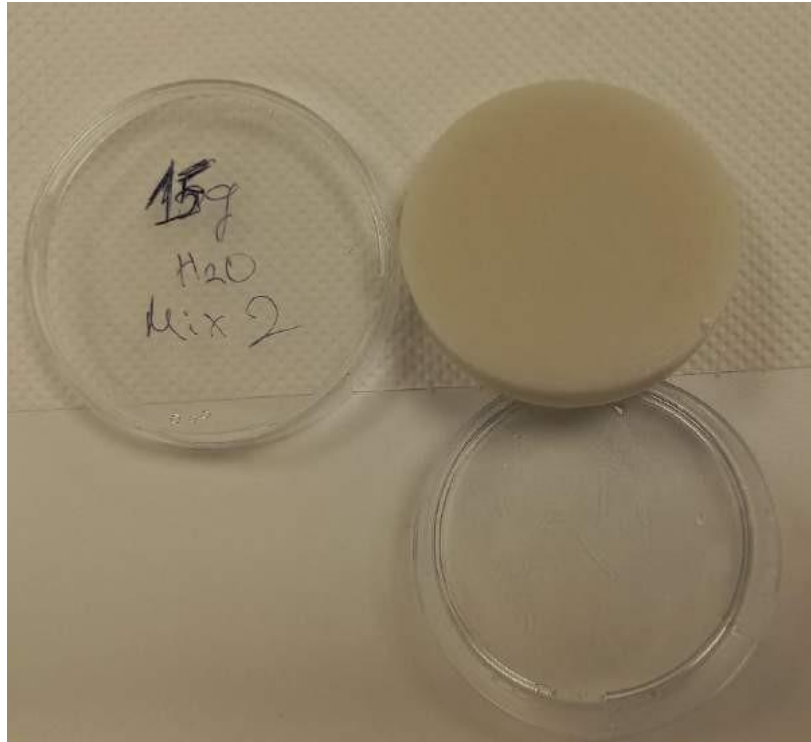
Εικόνα 98: 1<sup>η</sup> μέρα της 1<sup>ης</sup> σειράς δοκιμίων

Την επόμενη Τρίτη 4 Απριλίου 2023, τα δοκίμια διατηρούν τους χρωματισμούς τους, δεν παρατηρείται σημαντική διαφορά.

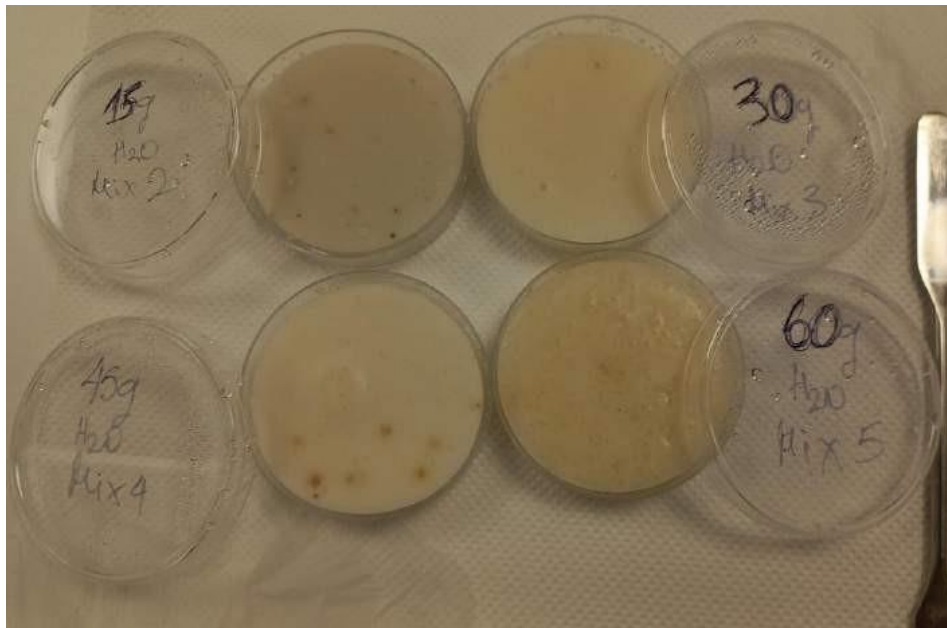


Εικόνα 99: Δοκίμια 1<sup>ης</sup> σειράς 1 εβδομάδα μετά τη δημιουργία τους

Στις 11 Απριλίου 2023, τα δοκίμια ξεκινούν να χάνουν ελάχιστα το έντονο χρώμα τους, φαίνεται ότι λαμβάνουν μία ελάχιστα πιο γκρίζα εμφάνιση συγκριτικά με τις προηγούμενες εβδομάδες. Όμως, δεν υπάρχουν σημάδια για εμφάνιση μούχλας.



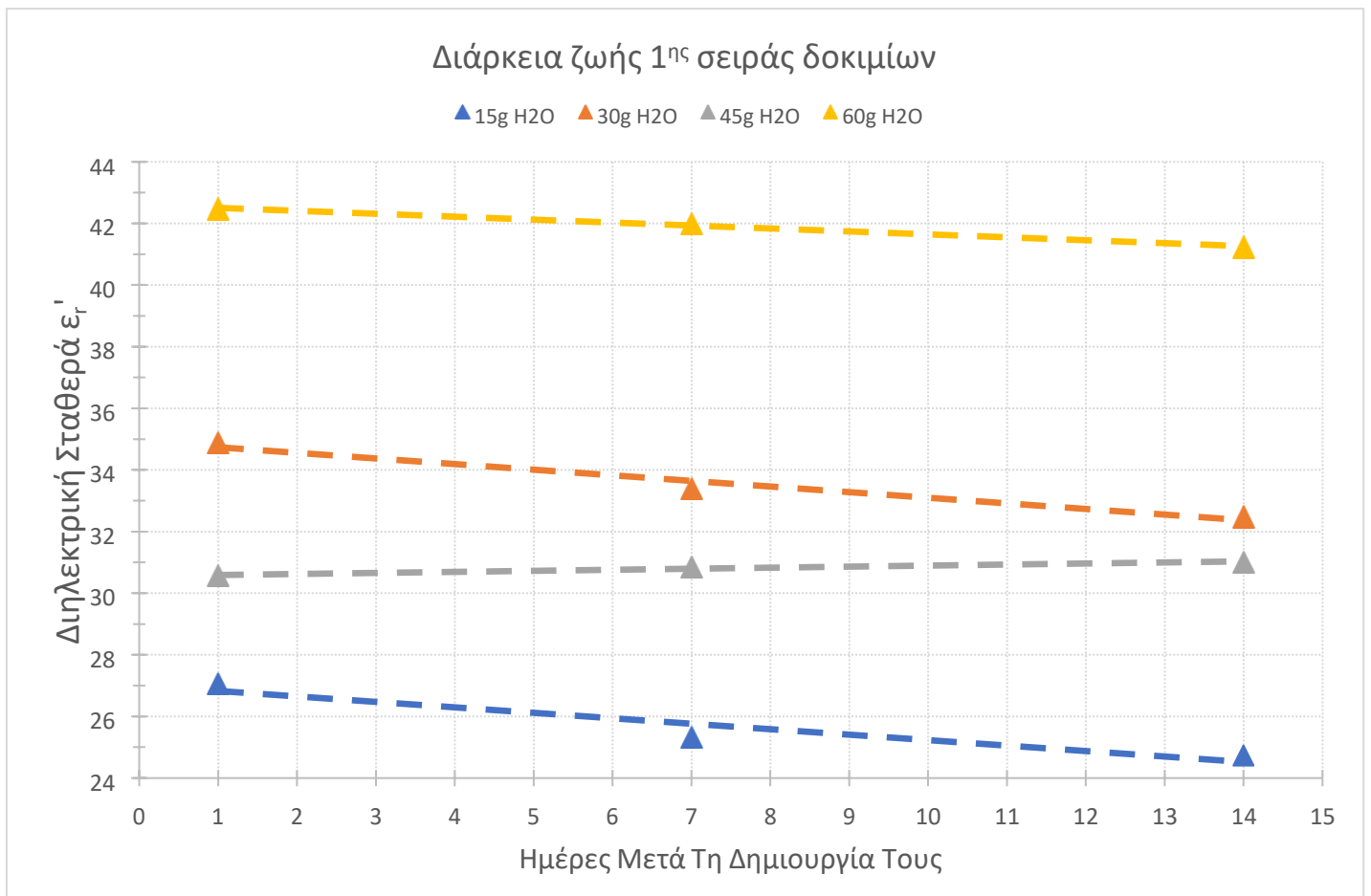
Εικόνα 100: Δοκίμιο mix 2 της 1<sup>ης</sup> σειράς, 2 εβδομάδες μετά τη δημιουργία του. Την επόμενη εβδομάδα 19/04/2023 έπεται να είναι και η τελευταία των δοκιμών καθώς υπάρχουν εμφανή σημεία με μούχλα. Αυτά είναι ορατά με το μάτι, έχοντας καφέ και μαύρη απόχρωση.



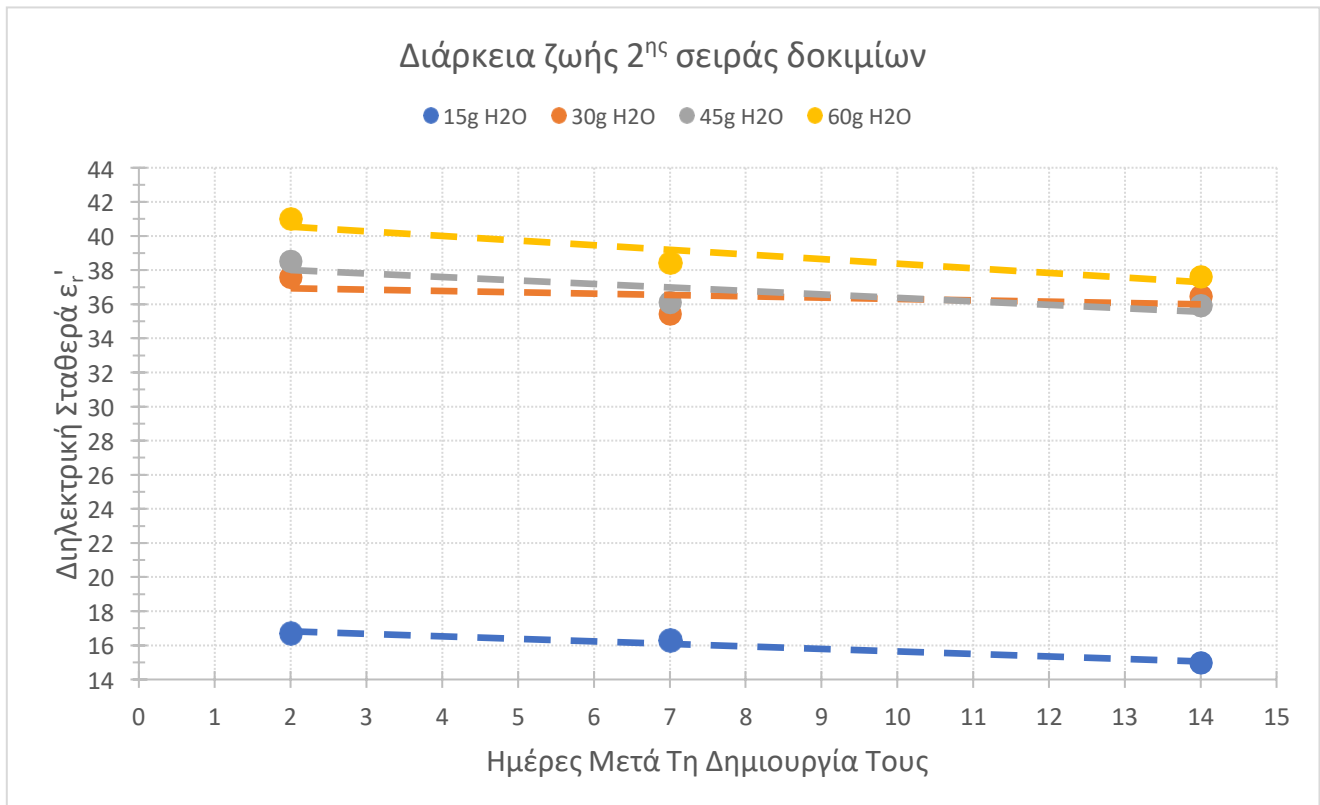
Εικόνα 101: Δοκίμια 1<sup>ης</sup> σειράς, 3 εβδομάδες μετά τη δημιουργία τους. Η συνολική διάρκεια ζωής όλων των σειρών εμφανίζεται στον πίνακα και τα διαγράμματα παρακάτω.

α/α	1η Σειρά Δοκιμίων	2η Σειρά Δοκιμίων	3η Σειρά Δοκιμίων
Ημέρα Κατασκευής	Τρίτη, 28 Μάρτιος 2023	Τετάρτη, 29 Μάρτιος 2023	Παρασκευή, 31 Μάρτιος 2023
1η Μέτρηση	Τετάρτη, 29 Μάρτιος 2023	Παρασκευή, 31 Μάρτιος 2023	Δευτέρα, 3 Απρίλιος 2023
2η Μέτρηση	Τρίτη, 4 Απρίλιος 2023	Τετάρτη, 5 Απρίλιος 2023	Παρασκευή, 7 Απρίλιος 2023
3η Μέτρηση	Τρίτη, 11 Απρίλιος 2023	Τετάρτη, 12 Απρίλιος 2023	Πέμπτη, 13 Απρίλιος 2023
Απόσυρση Δοκιμίων	Τετάρτη, 19 Απρίλιος 2023	Τετάρτη, 19 Απρίλιος 2023	Παρασκευή, 21 Απρίλιος 2023
Διάρκεια Ζωής Σε Μέρες	22	21	21

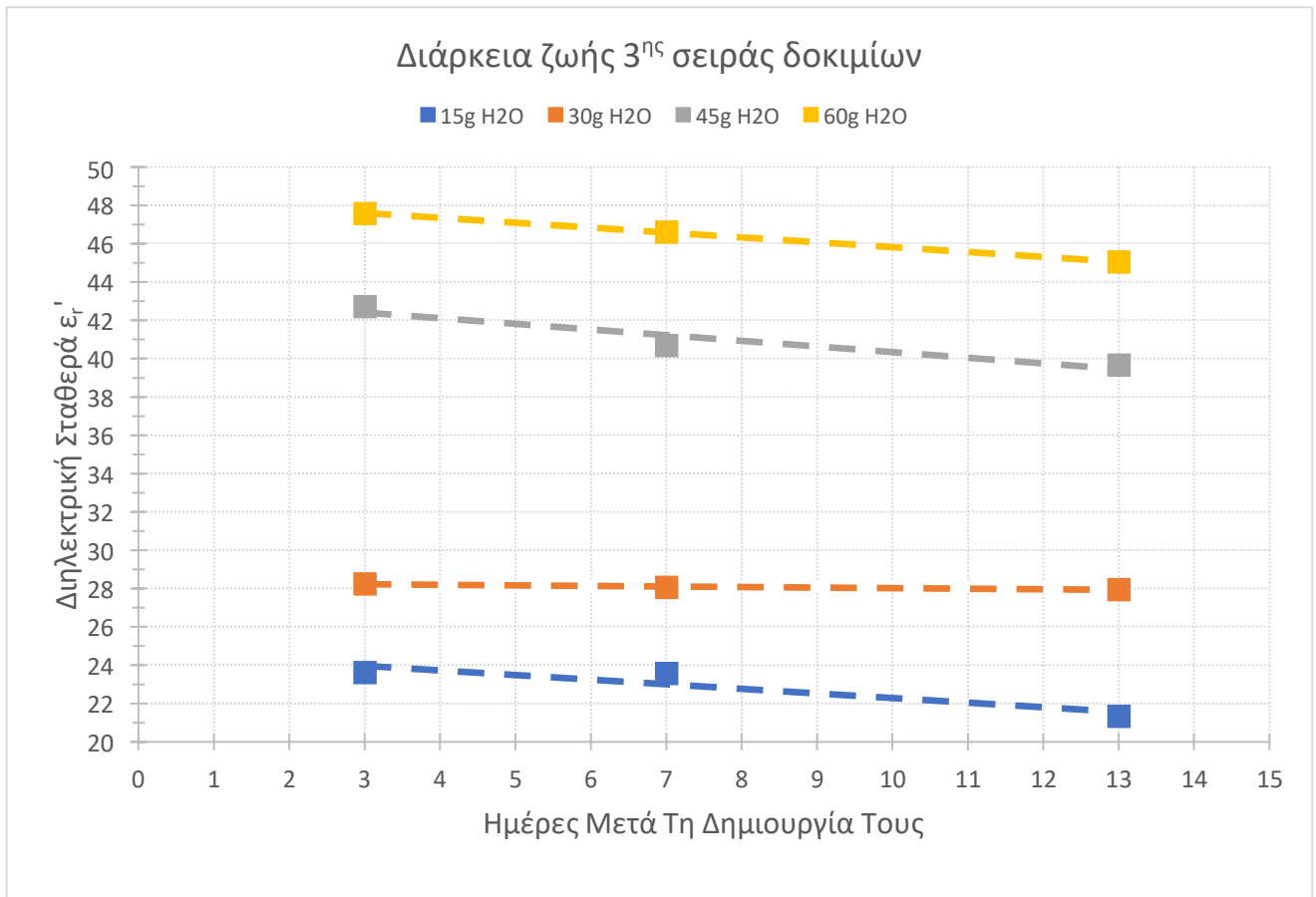
Πίνακας 43: Διάρκεια ζωής κάθε σειράς δοκιμίων με ημερομηνίες



Διάγραμμα 11: Διάρκεια ζωής για την 1<sup>η</sup> σειρά δοκιμίων



Διάγραμμα 12: Διάρκεια ζωής για την 2<sup>η</sup> σειρά δοκιμών



Διάγραμμα 13: Διάρκεια ζωής για την 3<sup>η</sup> σειρά δοκιμών

Ένα μικρό σχόλιο για τη διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r$  των δοκιμίων είναι ότι αυτή ελαττώνεται καθώς έρχονται πιο κοντά στην απόσυρση τους. Όταν αποκαλύπτονται σημάδια μούχλας, έχει μειωθεί η τιμή του  $\epsilon_r$  περίπου 1-3 μονάδες. Η διάρκεια ζωής τους είναι περίπου 3 εβδομάδες από τη μέρα δημιουργίας τους.

### 5.7 Συμπεράσματα, Περιορισμοί & Προτάσεις

Συμπερασματικά, πετύχαμε να οριστικοποιήσουμε και να αυτοματοποιούμε το καινούργιο πρωτόκολλο ύστερα από πολλαπλές προσπάθειες, λάβαμε υπόψιν, προσδιορίσαμε όλες τις παραμέτρους μας (αναλογία απιονισμένου νερού – σιλικόνης, συχνότητα & διηλεκτρική σταθερά) και κατασκευάσαμε από την αρχή μία τρισδιάστατη επιφάνεια για την εύρεση του μεγέθους που αναζητούμε. Επιπλέον, δημιουργήσαμε μαθηματικό μοντέλο/καμπύλη με πολύ χαμηλές τιμές τυπικής απόκλισης και συντελεστή μεταβλητότητας μεταξύ των πειραματικών δεδομένων. Προσδιορίσαμε με καλή ακρίβεια και καταφέραμε να φτιάξουμε σύνθετο υλικό με απαιτούμενες τιμές στόχους διηλεκτρικής σταθεράς (διαστρωμάτωση κεραίας & ανθρώπινο ομοίωμα). Τέλος, διευρύνουμε το εύρος μελέτης αναλογίας απιονισμένου νερού – σιλικόνης και κατά συνέπεια το διάστημα της διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r$ .

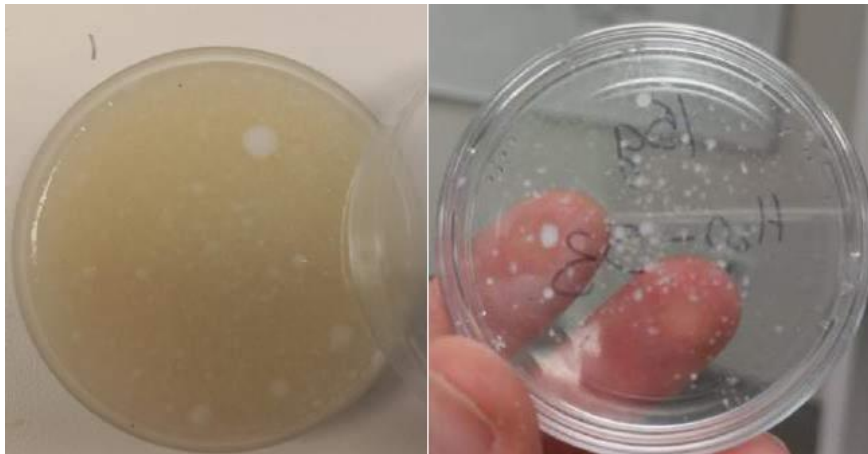
Στη χρονική περίοδο που εκπληρώσαμε τη μελέτη μας, κρατούσαμε σημειώσεις σε ένα τετράδιο σχετικά με παρατηρήσεις που προέκυπταν από τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας και όχι μόνο. Αναφέρουμε προβληματισμούς και προτάσεις που προτείνουμε για μελλοντική ενασχόληση.

#### Αδυνατότητα ομογενοποίησης διαλύματος & βάθος αναδευτήρα

Οι 2 ρυθμιστές της διηλεκτρικής σταθεράς, το απιονισμένο νερό και η υγρή σιλικόνη, δεν μπορούν να διαλυθούν πλήρως το ένα στο άλλο, καθώς η σιλικόνη είναι υδρόφοβη. Αυτό έχει ως επακόλουθο, να μας δυσκολεύει στη διαδικασία ανάδευσης του μείγματος και να επηρεάζει όχι μόνο την τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς του τελικού δοκιμίου υπό εξέταση αλλά και την υφή του. Το παραπάνω γίνεται αντιληπτό από τα προβλήματα που προέκυψαν στο κεφάλαιο 5.2.

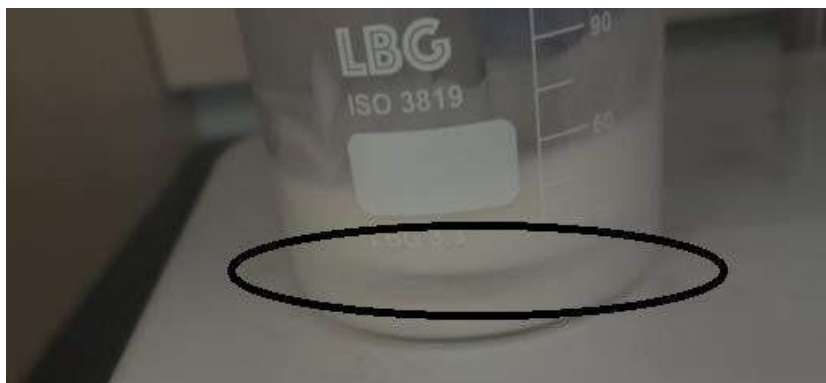
Επιπλέον, λόγω της φύσης της αδιαλυτότητας των 2 κύριων ουσιών, εμφανίζονταν αρκετές φορές στην κάτω επιφάνεια του καλουπιού, επικαθίσεις μικρών κηλίδων σιλικόνης.

Μία εναλλακτική για τη σιλικόνη ως υλικό χαμηλής διηλεκτρικής σταθεράς αποτελεί η σκόνη πολυαιθυλενίου.



Εικόνα 102: Ανομοιογενές μείγμα & επικαθίσεις σιλικόνης

Στο νέο πρωτόκολλο, η τοποθέτηση του αναδευτήρα επηρεάζει την ποιότητα και σύσταση του τελικού υλικού. Αρχικά, είναι αναγκαίο να είναι αρκετά βαθιά στο ποτήρι ζέσεως καθώς υπάρχουν κόκκοι ζελατίνης. Επίσης, άμα το ποτήρι ζέσεως είναι πολύ στενό τότε χρειάζεται να τροποποιήσουμε το βάθος του αναδευτήρα γιατί δεν θα έχουμε το αρεστό αποτέλεσμα. Απαιτείται από εμάς ανά τακτά διαστήματα, να αναδεύουμε παράλληλα με προσοχή χρησιμοποιώντας τη μεταλλική σπάτουλα.



Εικόνα 103: Βάθος ηλεκτρικού αναδευτήρα

#### Φυσαλίδες στα δοκίμια

Παρατηρήσαμε ότι κατά την έγχυση του υλικού στο καλούπι και ψύξη του, στην επάνω επιφάνεια εμφανίζονταν φυσαλίδες, οι οποίες έσκαγαν και έτσι δημιουργούσαν μικρές «τρυπούλες» στα δοκίμια. Άρα, όταν πηγαίναμε να μετρήσουμε τη διηλεκτρική σταθερά σε αυτή την επιφάνεια, θα λαμβάναμε μικρότερη τιμή λόγω του αέρα που εγκλωβίζεται μέσα στις τρύπες. Αυτός είναι ο κύριος λόγος που αποφασίσαμε να ασχοληθούμε με τη μέτρηση της κάτω επιφάνειας, καθώς διαφορετικά δεν θα είχαμε συνέπεια στα δεδομένα μας. Η άμεση ψύξη πιθανώς να επίλυε αυτό το πρόβλημα.



Εικόνα 104: Μικρές «τρυπούλες» στην επάνω επιφάνεια του δοκιμίου

#### Διαφορά διηλεκτρικής σταθεράς στις επιφάνειες του δοκιμίου

Εμείς πραγματοποιούμε τη μελέτη μας, για τη διηλεκτρική σταθερά της κάτω επιφάνειας του δοκιμίου. Όταν μετράγαμε και την άνω επιφάνεια, προέκυπτε μια σημαντική διαφορά ανάμεσα στις τιμές. Μερικές φορές, υπήρχε απόκλιση ακόμα και 10 μονάδες για το μέγεθος  $\epsilon_r'$ . Άρα, ήταν αναγκαίο να ορίσουμε την επιφάνεια, με την οποία θα ασχοληθούμε. Επομένως, η διηλεκτρική σταθερά ολόκληρου του

υλικού αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα και θα μπορούσε να υπάρχει μία επιπλέον έρευνα σχετικά με την αλλαγή του  $\epsilon_r$ , με βάση το πάχος του υλικού.

#### Απώλεια επαφής – κενά αέρος ανάμεσα στο δοκίμιο και τον ομοαξονικό ανιχνευτή

Η μέθοδος με την οποία επιλέγουμε να μετρήσουμε τη διηλεκτρική ιδιότητα έχει το αρνητικό ότι ο αέρας παρεμβάλλεται ανάμεσα στο εξεταζόμενο υλικό και τον ανιχνευτή. Άρα, θέλει προσοχή να μην αλλοιώνονται οι μετρούμενες τιμές από τη χαμηλή τιμή διηλεκτρικής σταθεράς του αέρα. Η γεωμετρία του δοκιμίου και η σωστή χρήση-τοποθέτηση του εργαστηριακού εξοπλισμού μέτρησης είναι σημαντικές παράμετροι για την ελάττωση πιθανών σφαλμάτων.

#### Πλήθος μετρήσεων & χρόνος πειράματος

Το εύρος αναλογίας απιονισμένου νερού – σιλικόνης της εργασίας μας είναι από 0:1 έως 6:1 και επιλέξαμε να διαιρέσουμε στα 4. Ο περιορισμένος χρόνος εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας και η χρονοβόρα πειραματική διαδικασία (τουλάχιστον 20' για τη δημιουργία ενός καλουπιού), μας έκανε να επιλέξουμε αυτόν το διαχωρισμό. Τελικά, λάβαμε τιμές διηλεκτρικής σταθεράς για αναλογίες 1.5, 3, 4.5, 6 και εξαγάγαμε τα αντίστοιχα συμπεράσματα. Σε μια μελλοντική μελέτη, θα μπορούσε να μειωθεί το βήμα για να έχουμε μια πιο λεπτομερή ανάλυση, καθώς και να επιτευχθεί μικρότερη συνολική διάρκεια πειράματος μεταβάλλοντας τη μορφή του πειράματος.

#### Μικρές αναλογίες απιονισμένου νερού - σιλικόνης

Μία βασική προϋπόθεση που έχουμε εισάγει στο δικό μας πείραμα είναι ότι η ποσότητα της σιλικόνης παραμένει σταθερή και ίση με 10 g. Κατά την περίοδο, δημιουργίας νέου πρωτόκολλου, για αναλογία νερού – σιλικόνης 1,5:1 δυσκολευτήκαμε στη διαδικασία της ανάδευσης λόγω των μικρών ποσοτήτων συστατικών καθώς και των διαστάσεων διαμέτρου του αναδευτήρα και ποτηριών ζέσεως (beaker). Για μελέτη μικρότερων αναλογιών, θα επιθυμούσαμε πιο αρμόζουσες διαστάσεις για τον εργαστηριακό εξοπλισμό.

Από την άλλη, αν διαλέγαμε να παραμελήσουμε την ποσότητα των 10 g σιλικόνης και τοποθετούσαμε όσο θέλουμε, με σεβασμό στις αντίστοιχες αναλογίες, τότε θα είχαμε πρόβλημα με τους χρόνους του πειράματος καθώς θα είχαμε κατώτερη ποιότητα ανάδευσης των υλικών. Επομένως, η αντικατάσταση της σιλικόνης από ένα άλλο υλικό χαμηλού  $\epsilon_r$  και καλύτερης δυνατότητας ανάμειξης με το νερό, αποτελεί μία λύση.

#### Ακρίβεια εργαστηριακού εξοπλισμού

Από την 1<sup>η</sup> στιγμή, έγινε αντιληπτό ότι ο εργαστηριακός ζυγός ήθελε πολύ διεξοδικό χειρισμό καθώς αργούσε να εμφανίσει μέτρηση όταν τοποθετούσαμε ποσότητα στο ποτήρι ζέσεως. Η προσθήκη των συστατικών έπρεπε να γίνει γρήγορα καθώς μόνο τότε εμφανίζονταν η μέτρηση, διαφορετικά αντιμετωπίζαμε ζήτημα σχετικά με την αξιοπιστία της μέτρησης. Για παράδειγμα, όταν τοποθετούσαμε αργά σταγόνες απιονισμένου νερού στο ποτήρι, λαμβάναμε ψηφιακή μέτρηση ανά 0,3 g (π.χ. μάζα νερού από 14,4 g σε 14,7 g) ενώ θεωρητικά η διακριτική ικανότητα του ζυγού ισούται με 0,1 g.

Επίσης, όταν ανακινούσαμε το περιεχόμενο του ποτηριού ζέσεως πάνω στη ζυγαριά και μετά σταματάγαμε, μερικές φορές άλλαζε η ένδειξη κατά 0,1 – 0,2 g. Εκπληρώνοντας την πειραματική διαδικασία πολλαπλές φορές, αποκτήσαμε την



αίσθηση των ποσοτήτων που χειριζόμαστε και πέρα από τον εργαστηριακό ζυγό, χρησιμοποιούσαμε την κριτική μας σκέψη. Όταν πιστεύαμε ότι το μετρητικό όργανο πιθανώς να μας δείχνει λανθασμένη τιμή, εκκινούσαμε το πείραμα από την αρχή.

Επιπλέον, η θερμαντική πλάκα τύχαινε να αυξάνει τη θερμοκρασία όταν αφαιρούσαμε το ποτήρι από αυτήν. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε στο 9<sup>ο</sup> βήμα του καινούργιου πρωτόκολλου, όπου η θερμοκρασία από τους 90°C ανέβαινε μέχρι και την τιμή των 93°C. Με αγορά πιο σύγχρονου εξοπλισμού, θα εξοικονομούσαμε χρόνο.



Εικόνα 105: Αύξηση θερμοκρασίας θερμαινόμενης επιφάνειας

#### Μικρή διάρκεια ζωής σύνθετου υλικού

Το τελικό υλικό είναι αναγκαίο να εξετάζεται τις επόμενες μέρες καθώς δεν έχει μεγάλη διάρκεια ζωής, όσο περνάνε οι μέρες μειώνεται η διηλεκτρική του σταθερά και είδαμε ότι μετά από 20 μέρες περίπου τα δοκίμια εμφάνισαν μούχλα λόγω του νερού. Προσθέτοντας το υλικό μονοϋδρικό αφυδροξικό νάτριο (sodium dehydroacetate monohydrate), θα μπορούσαμε να αυξήσουμε το χρόνο συντήρησης του σύνθετου υλικού.



Εικόνα 106: Δοκίμιο με μούχλα

## Βιβλιογραφία

- [1] Andryieuski, A., Kuznetsova, S., Zhukovsky, S. V., Kivshar, Y., & Lavrinenko, A. V. (2015). Water: Promising Opportunities For Tunable All-dielectric Electromagnetic Metamaterials. <https://doi.org/10.1038/srep13535>
- [2] Metallurgy & Materials Engineering. Arshad Muhammad. (2015). Liberty Ship Failures. <https://metallurgyandmaterials.wordpress.com/2015/12/25/liberty-ship-failures/>
- [3] WhatIs.com. Awati Rahul. (2022). Dielectric material. <https://www.techtarget.com/whatis/definition/dielectric-material>
- [4] WhatIs.com. Awati Rahul. (2022). Permittivity (electric permittivity). <https://www.techtarget.com/whatis/definition/permittivity-electric-permittivity>
- [5] Barron, A. (2012). Physical Methods in Chemistry and Nano Science
- [6] Britannica, The Editors of Encyclopaedia. (2023) "electromagnetic spectrum". Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/electromagnetic-spectrum>. Accessed 25 May 2023.
- [7] Canicatti, E., Monacelli, G, Sanchez-Bayuela, D. A., Vispa, A., Sani, L., Monorchio, A., & Tiberi, G. (2022). Anatomical and Dielectric Tissue Mimicking Phantoms for Microwave Breast Imaging. <https://doi.org/10.23919/EuCAP53622.2022.9769421>
- [8] Chew, K. M., Sudirman, R., Seman, N., & Yong, C. Y. (2012). Human Brain Phantom Modeling Based on Relative Permittivity Dielectric Properties. <https://doi.org/10.1109/iCBEB.2012.239>
- [9] Cho, E., Chiu, L. L. Y., Lee, M., Naila, D., Sadanand, S., Waldman, S. D., & Sussman, D. (2021). Characterization of Mechanical and Dielectric Properties of Silicone Rubber. <https://doi.org/10.3390/polym13111831>
- [10] Composites Knowledge Network. (2021). Fundamentals of composite materials – A100. <https://compositeskn.org/KPC/A100>
- [11] Danciu, M., Stratulat, T. A., Stefanescu, C., Dodi, G., Tamba, B. I., Mihai, C. T., Stanciu, G. D., Luca, A., Spiridon, I. A., Ungureanu, L. B., Ianole, V., Ciortescu, I., Mihai, C., Stefanescu, G., Chirila, I., Ciobanu, R., & Drug, V. L. (2019). Terahertz Spectroscopy and Imaging: A Cutting-Edge Method for Diagnosing Digestive Cancers. <https://doi.org/10.3390/ma12091519>
- [12] Drake, F. H., Pierce, G. W., & Dow, M. T. (1930). Measurement of the dielectric constant and index of refraction of water and aqueous solutions of KCl at high frequencies. Physical Review Volume 35, 613. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.35.613>
- [13] Di Meo, S., Pasotti, L, Pasian, M., & Matrone, G. (2018). Realization of breast tissue-mimicking phantom materials: dielectric characterization in the 0,5 – 50 GHz frequency range. <https://doi.org/10.1109/IMBIOC.2018.8428885>
- [14] Ellingson, Steven W. (2018). Electromagnetics. Volume 1
- [15] Harris, B. (1999). Engineering Composite Materials

- [16] Science Notes. Helmenstine Anne. (2021). Difference Between Ionizing and Non-Ionizing Radiation. <https://sciencenotes.org/difference-between-ionizing-and-non-ionizing-radiation/>
- [17] Hunold, A., Machts, R., & Haueisen, J. (2020). Head phantoms for bioelectromagnetic applications: a material study. <https://doi.org/10.1186/s12938-020-00830-y>
- [18] Islam, Md T., Samsuzzaman, Md, Kibria, S., & Islam, M. T. (2018). Experimental Breast Phantoms for Estimation of Breast Tumor Using Microwave Imaging Systems. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2885087>
- [19] DataSpectrum. Jaszczak Monica. (2023). What is a phantom? How does it work? <https://www.spect.com/blog/what-is-a-phantom-how-does-it-work/>
- [20] Jilani, M. T., Rehman, M. Z. U., Khan, A. M., Khan, M. T., & Ali S. M. (2012). A Brief Review of Measuring Techniques for Characterization of Dielectric Materials, Volume 1, Issue 1.
- [21] Khan Academy. (2016). What are dielectrics? <https://www.khanacademy.org/science/in-in-class-12th-physics-india/in-in-electrostatic-potential-and-capacitance/x51bd77206da864f3:effect-of-dielectric-on-capacitance/a/dielectric-article>
- [22] Kumar, Y. K., & Lohchab, D. S. (2016). Influence of Aviation Fuel on Mechanical Properties of Glass Fiber-Reinforced Plastic Composite.
- [23] La Gioia, A., Porter, E., Merunka, I., Shahzad, A., Salahuddin, S., Jones, M., & O'Halloran, M. (2018). Open-Ended Coaxial Probe Technique for Dielectric Measurement of Biological Tissues: Challenges and Common Practices. <https://doi.org/10.3390/diagnostics8020040>
- [24] Ling, S. J., Sanny, J., & Moebis, W. (2016). University Physics. Volume 2.
- [25] Liu, S., Wu, J., Zhang, L., & Dong, H. (2011). Behaviour of Electromagnetic Waves in Different Media and Structures.
- [26] Md Said, M. S., Seman, N., & Jaafar, H. (2015). Characterization of Human Head Phantom based on its Dielectric Properties for Wideband Microwave Imaging Application. <https://doi.org/10.11113/jt.v73.4405>
- [27] Mohammed, J. B., Abbosh, A., Henin, B., & Sharpe P. (2012). Head phantom for testing microwave systems for head imaging. <https://doi.org/10.1109/CIBEC.2012.6473320>
- [28] National Aeronautics and Space Administration. (2013). The Electromagnetic Spectrum. <https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrum1.html>
- [29] Nijssen, R.P.L. (2015). Composite materials. An introduction
- [30] Riera, B. O. (2016). Permittivity measurements using coaxial probes. [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/105640/Permittivity%20Measurements%20using%20coaxial%20probes\\_BartomeuOliverRiera.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/105640/Permittivity%20Measurements%20using%20coaxial%20probes_BartomeuOliverRiera.pdf)
- [31] Said, M. S. M., Seman, N., Rahim M. K. A., & Rahman T. A. (2014). Investigation on Dielectric Properties in Gelatin-Based Phantom for Human Brain. <https://doi.org/10.1109/ISANP.2014.7026786>

- [32] Venkatesh, M. S., & Raghavan, G. S. V. (2005). An Overview of Dielectric Properties Measuring Techniques.
- [33] Wang, Z., Lim, Y. T., Tang, Y., & Leach, M. (2014). Medical Applications of Microwave Imaging. <https://doi.org/10.1155/2014/147016>
- [34] Wikipedia. (2023). Electromagnetic Spectrum. [https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic\\_spectrum](https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_spectrum)
- [35] Wikipedia. (2023). Relative permittivity. [https://en.wikipedia.org/wiki/Relative\\_permittivity](https://en.wikipedia.org/wiki/Relative_permittivity)
- [36] Wikipedia. (2021). Silicone. <https://en.wikipedia.org/wiki/Silicone>
- [37] Australian Academy of Science. Williams Jim. (2015). The science and technology of composite materials. <https://www.science.org.au/curious/technology-future/composite-materials>
- [38] Zivkovic, I., & Murk, A. (2012). Free-Space Transmission Method for the Characterization of Dielectric and Magnetic Materials at Microwave Frequencies. <https://doi.org/10.5772/51596>
- [39] Zwinkels, J. C. (2015). Light, Electromagnetic Spectrum. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-27851-8\\_204-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27851-8_204-1)
- [40] Ατρέας, Ν. Δ. (2007). Αριθμητική Ανάλυση.
- [41] Παπαδόπουλος, Γ. (2015). Εισαγωγή στις Πιθανότητες και τη Στατιστική.
- [42] Σαρρής, Ι. Ε., & Καρακασίδης, Θ. (2019). Αριθμητικές Μέθοδοι και Εφαρμογές για Μηχανικούς.
- [43] Τι είναι η αναπαραγωγιμότητα και η επαναληψιμότητα; (2018). <https://el.thpanorama.com/articles/ciencia/qu-son-la-reproducibilidad-y-repetibilidad.html>