

# Τεχνικές Μη Καταστρεπτικών Δοκιμών

ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ ΑΝΤΗΧΕΙΟ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΡΠΩΝ

ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ (8462)

ΚΑΛΙΤΣΙΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (8679)

ΚΑΤΣΑΡΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (8765)

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή.....	2
2. Θεωρητική Ανάλυση .....	3
3. Σχεδίαση Αντηχείου στο CST .....	7
4. Κατασκευή Αντηχείου.....	18
5. Αποτελέσματα Εργασίας .....	22
6. Συμπεράσματα.....	40
7. Παράρτημα Α .....	41
8. Παράρτημα Β .....	44

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

Το παρόν έγγραφο αποτελεί την αναφορά της εργασίας εξάμηνου που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του μαθήματος **Τεχνικές Μη Καταστρεπτικών Δοκιμών**. Το αντικείμενο της εργασίας πραγματεύεται τη δημιουργία ενός **μεταλλικού κυλινδρικού αντηχείου** με τη χρήση του οποίου είναι δυνατή η **μέτρηση της σχετικής υγρασίας καρπών**.

Ο λόγος για τον οποίο είναι επιθυμητή η κατασκευή μίας τέτοιας συσκευής αφορά τον έλεγχο και την ποιότητα αγροτικών προϊόντων κατά τη διάρκεια συλλογής, αποθήκευσης και επεξεργασίας. Είναι γνωστό ότι μικρή ποσότητα προϊόντος με μεγάλη υγρασία μπορεί να αλλοιώσει ολόκληρο το φορτίο μίας παρτίδας συλλεγμένων αγροτικών προϊόντων. Συνεπώς, είναι εξέχουσας σημασίας η μέτρηση της κατανομής της υγρασίας σε ένα φορτίο και όχι μόνο η μέση τιμή.

Παραπάνω έγινε μία σύντομη εισαγωγή στο αντικείμενο της εργασίας. Ακολούθως, στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζεται η θεωρητική ανάλυση και στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο η επιβεβαίωση της θεωρητικής ανάλυσης μέσω του προγράμματος CST. Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται τα υλικά και η διαδικασία κατασκευής του αντηχείου, ενώ στο 5<sup>ο</sup> τα αποτελέσματα των μετρήσεων όπως αυτά αναλύθηκαν στο MATLAB. Τέλος, στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο συνοψίζονται τα αποτελέσματα και παρουσιάζονται τα σημαντικότερα συμπεράσματα.

## 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η σχετική μέτρηση της υγρασίας ενός καρπού μπορεί να γίνει με τη χρήση ενός αντηχείου. Η αρχή λειτουργίας της μέτρησης στηρίζεται στις διηλεκτρικές ιδιότητες των ξηρών καρπών, οι οποίες χαρακτηρίζουν την αλληλεπίδραση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με αυτούς.

Η περιγραφή γίνεται μέσω της μιγαδικής διηλεκτρικής διαπερατότητας  $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$ , όπου  $\varepsilon'$  είναι η διηλεκτρική σταθερά (ικανότητα του υλικού να αποθηκεύει την ηλεκτρική ενέργεια) και  $\varepsilon''$  ο παράγοντας απωλειών (ικανότητα του υλικού να διαχέει την ηλεκτρική ενέργεια με τη μορφή θερμότητας).

Στις μικροκυματικές συχνότητες, οι διηλεκτρικές ιδιότητες των ξηρών καρπών εξαρτώνται από τη συσκευασία, τη σύνθεση και τη θερμοκρασία τους. Ένας συνήθης τρόπος προσέγγισης του υπολογισμού των διηλεκτρικών ιδιοτήτων προκύπτει από το συντελεστή διάδοσης με βάση τις παρακάτω σχέσεις:

$$\varepsilon' = \left[ 1 - \left( \frac{\varphi - 360n}{360d} \right) \left( \frac{c}{f} \right) \right]^2, \quad \varepsilon'' = -\frac{20 \log |S_{21}| c}{8.686\pi d} \left( \frac{c}{f} \right) \sqrt{\varepsilon'}$$

όπου  $|S_{21}|$  είναι το πλάτος και  $\varphi$  η φάση του συντελεστή διάδοσης,  $c$  η ταχύτητα του φωτός,  $f$  η συχνότητα,  $d$  το πάχος του στρώματος του ξηρού καρπού και  $n$  ένας ακέραιος αριθμός χαρακτηριστικός για κάθε καρπό.

Μπορούν να γίνουν, λοιπόν, οι εξής παρατηρήσεις:

- Όταν ένα μικρό τμήμα διηλεκτρικού υλικού εισαχθεί στο εσωτερικό ενός μικροκυματικού αντηχείου, η συχνότητα συντονισμού της διάταξης μεταβάλλεται κατά μια συγκεκριμένη ποσότητα και ο συντελεστής ποιότητας  $Q$  της κοιλότητας ελαττώνεται.
- Όταν το ποσοστό της υγρασίας στον ξηρό καρπό αλλάζει, μια αντίστοιχη μεταβολή παρατηρείται στις κυματικές παραμέτρους του αντηχείου.
- Επειδή η σχετική διηλεκτρική διαπερατότητα του νερού διαφέρει από εκείνη των περισσότερων υδροσκοπικών υλικών, η επίδρασή της μπορεί να διαχωριστεί από την επίδραση του ξηρού διηλεκτρικού υλικού.

Σύμφωνα με τις διαφάνειες του μαθήματος, ορίζουμε το επί τοις εκατό ποσοστό της σχετικής υγρασίας:

$$M = (m_w)/(m_w + m_d) * 100$$

όπου  $m_w$  η μάζα του νερού και  $m_d$  η μάζα του ξηρού υλικού. Κατόπιν υποθέτουμε ότι κατά τη διάρκεια μίας μέτρησης, η μεταβολή της συχνότητας συντονισμού  $f$  δίνεται από την σχέση:

$$\Delta F = f_0 - f_s$$

όπου  $f_0$  η συχνότητα συντονισμού του κενού αντηχείου και  $f_s$  η συχνότητα συντονισμού του αντηχείου με τον καρπό. Ακολουθώντας, η ενέργεια στο δείγμα θα δίνεται συναρτήσει του συντελεστή  $Q$  από τη σχέση:

$$\frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q_0} \left( \frac{Q_0}{Q_s} - 1 \right) = \frac{\Delta T}{Q_0}$$

όπου  $\Delta T$  η μεταβολή του συντελεστή διάδοσης.

Οι παράμετροι  $\Delta F$ ,  $\Delta T$  συσχετίζονται με τη διηλεκτρική σταθερά, τον παράγοντα απωλειών, τον όγκο του καρπού  $u_c$  και τον όγκο του αντηχείου  $u_s$  μέσω των:

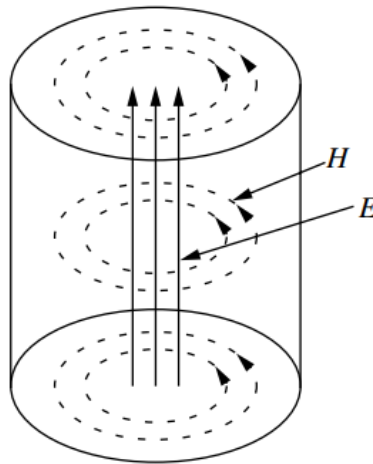
$$\Delta F = 2 \frac{\varepsilon' - 1}{K} f_0 \left( \frac{u_s}{u_c} \right) \quad , \quad \Delta T = \frac{4\varepsilon''}{K^2} Q_0 \left( \frac{u_s}{u_c} \right)$$

Όπου  $K$  ένας χαρακτηριστικός παράγοντας ζύγισης. Δεδομένου ότι οι καρποί έχουν όλοι ομοιόμορφο σχήμα το  $K$  παραμένει σταθερό. Ωστόσο, δεδομένου ότι ο όγκος των καρπών είναι άγνωστος, η μέτρηση της σχετικής υγρασίας μπορεί να είναι ανεξάρτητη του όγκου μόνο για το μέγεθος:

$$X = \frac{f_0 - f_s}{\frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_0}} = \frac{\Delta F}{\Delta T}$$

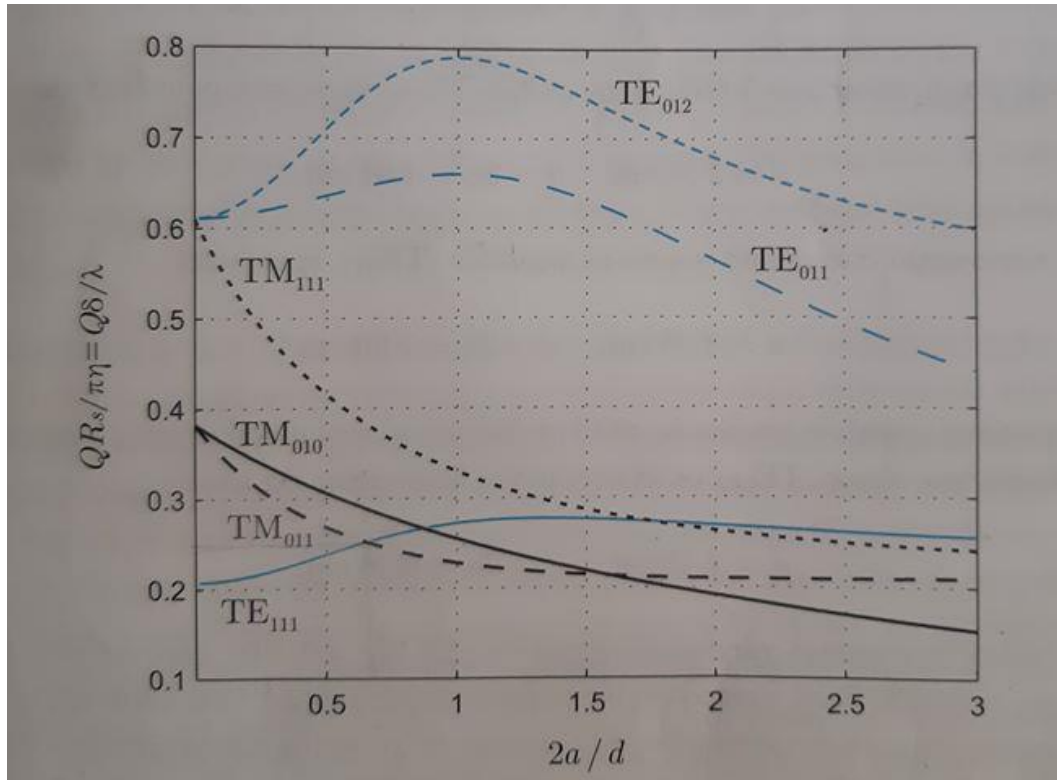
Στο σημείο αυτό έχουν περιγράψει πλήρως οι λόγοι για τους οποίους επιλέγεται η μέτρηση της σχετικής υγρασίας με τη χρήση αντηχείου. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η θεωρητική ανάλυση για το αντηχείο που κατασκευάστηκε στην εργασία αυτή.

Αρχικά, καθορίστηκε ο ρυθμός συντονισμού του κυλινδρικού αντηχείου. Ο ρυθμός συντονισμού που επιλέχθηκε για το συγκεκριμένο αντηχείο ήταν ο  $TM_{010}$ . Βασικός λόγος επιλογής του συγκεκριμένου ρυθμού ήταν η μορφή του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου που έχει αυτός στο εσωτερικό του κυλινδρικού αντηχείου. Πιο συγκεκριμένα, κατά μήκος του αντηχείου και στο κέντρο του, το ηλεκτρικό πεδίο μεγιστοποιείται, ενώ το μαγνητικό πεδίο ελαχιστοποιείται. Η απεικόνιση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 2.1 – Πεδίο  $E, H$ , ρυθμός  $TM_{010}$

Με βάση λοιπόν και την βιβλιογραφία, διαπιστώθηκε ότι η μορφή αυτή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου θα βοηθούσε στην καλύτερη καταγραφή της υγρασίας των ξηρών καρπών που θα χρησιμοποιούνταν στο πείραμα μας, καθώς αυτοί θα τοποθετούνταν στο κέντρο του αντηχείου για την πραγματοποίηση των μετρήσεων. Αφότου έγινε λοιπόν η επιλογή του ρυθμού συντονισμού, καθορίστηκε στην συνέχεια το μήκος του κυλινδρικού αντηχείου με βάση το διάγραμμα του συντελεστή ποιότητας ( $Q$ ) του  $TM_{010}$ .



Εικόνα 2.2 - Διάγραμμα Συντελεστή Ποιότητας - Μέγεθος Αντηχείου

Με στόχο την επίτευξη ενός ικανοποιητικά υψηλού συντελεστή ποιότητας και έχοντας ως δεδομένη την ακτίνα του αντηχείου, από τον χαλκοσωλήνα που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του, επιλέχθηκε:

$$d \cong 4a$$

Επομένως, οι τελικές διαστάσεις που προέκυψαν ήταν:

Μήκος ( $d$ )	13.2 cm
Εξωτερική Ακτίνα ( $a$ )	3.3375 cm
Εσωτερική Ακτίνα ( $a$ )	3.145 cm
Εξωτερική Διάμετρος	6.675 cm
Εσωτερική Διάμετρος	6.29 cm

Η συχνότητα συντονισμού του ρυθμού  $TM_{010}$  με βάση τις διαστάσεις αυτές υπολογίστηκε από τον τύπο:

$$f_r^{TM_{nm}} = \frac{c_0}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p_{nm}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2}, \quad l = 0, 1, 2, \dots$$

Προέκυψε  $f = 3.651 \text{ GHz}$ , η οποία είναι αρκετά κοντά στην περιοχή των 4 GHz που είναι και η επιθυμητή περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας του αντηχείου της συγκεκριμένης εργασίας.

Αφού υπολογίστηκε και η συχνότητα συντονισμού, το επόμενο βήμα ήταν να καθοριστεί το μέγεθος και ο τρόπος τοποθέτησης των μεταλλικών προβόλων πάνω στους SMA connectors. Αυτές οι παράμετροι έπρεπε να επιλεγούν με στόχο την βέλτιστη διέγερση του επιθυμητού ρυθμού.

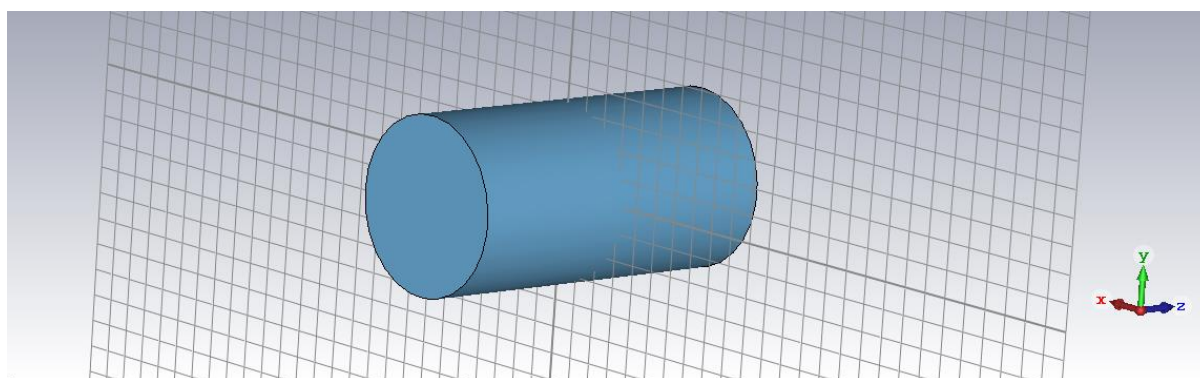
Διαπιστώθηκε πως για την διέγερση του ρυθμού  $TM_{010}$  θα έπρεπε οι πρόβολοι να βρίσκονται παράλληλα στο ηλεκτρικό πεδίο και επομένως το σημείο που θα τοποθετούνταν ήταν στο κέντρο των πλαϊνών βάσεων του αντηχείου με διεύθυνση κατά τον άξονα  $Z$ . Με αυτόν τον τρόπο θα ήταν εφικτή η διέγερση της συνιστώσας  $E_z$ , η οποία μεγιστοποιείται στις δύο βάσεις του αντηχείου. Για την επιλογή του μεγέθους των προβόλων όμως, με στόχο την επίτευξη μέγιστης μεταφοράς ισχύος μεταξύ των δύο θυρών, χρειάστηκε να γίνουν κάποιες προσομοιώσεις στο *CST* οι οποίες θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο.

### 3. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΑΝΤΗΧΕΙΟΥ ΣΤΟ CST

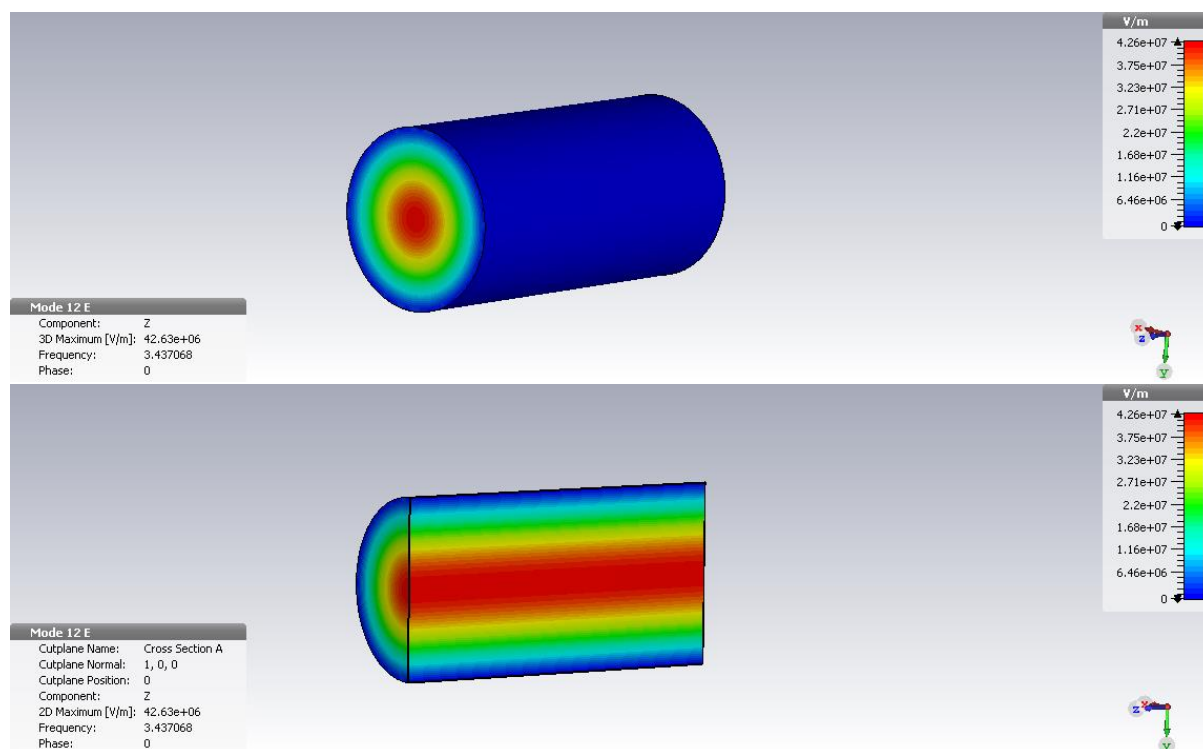
Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων της θεωρητικής ανάλυσης του προηγούμενου κεφαλαίου χρησιμοποιήθηκε το γνωστό εμπορικό υπολογιστικό πακέτο *CST MICROWAVE STUDIO 2017*. Αρχικά, σχεδιάστηκε ένα κυλινδρικό αντηχείο με διαστάσεις ίδιες με αυτές που υπολογίστηκαν στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο και στην συνέχεια έγιναν προσομοιώσεις με την βοήθεια του εργαλείου “*Eigenmode Solver*” που παρέχει το *CST*. Πραγματοποιήθηκαν δύο προσομοιώσεις με αυτό το εργαλείο. Στην πρώτη το κυλινδρικό αντηχείο κατασκευάστηκε με το υλικό Vacuum (κενό αέρος) και στην δεύτερη με το υλικό PEC. Στόχος των προσομοιώσεων αυτών ήταν η εύρεση του ρυθμού συντονισμού  $TM_{010}$  μέσω της μορφής του ηλεκτρικού πεδίου που έχει αυτός στο εσωτερικό του αντηχείου και η επαλήθευση της συχνότητας συντονισμού του που υπολογίστηκε στην θεωρητική ανάλυση. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνονται παρακάτω.

#### Eigenmode Solvers

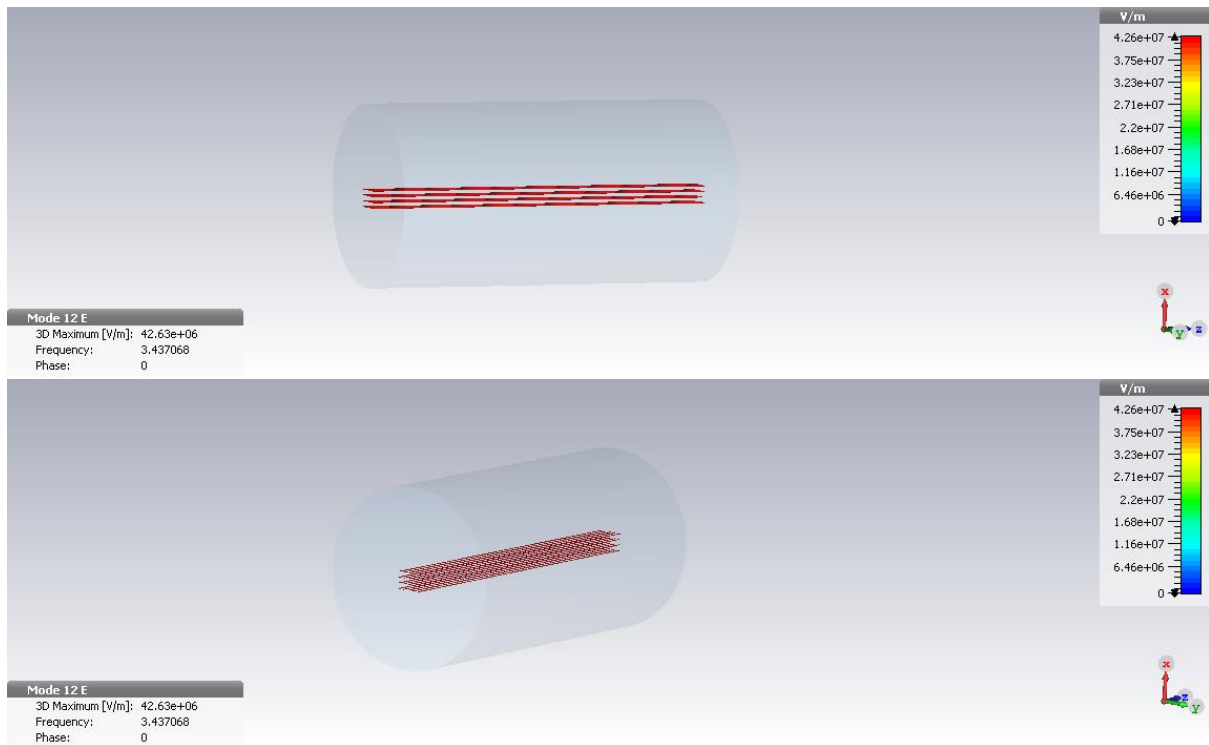
1. Κατασκευή Αντηχείου με υλικό Vacuum (κενό αέρος)



Εικόνα 4.1 - Αντηχείο κατασκευασμένο με Vacuum



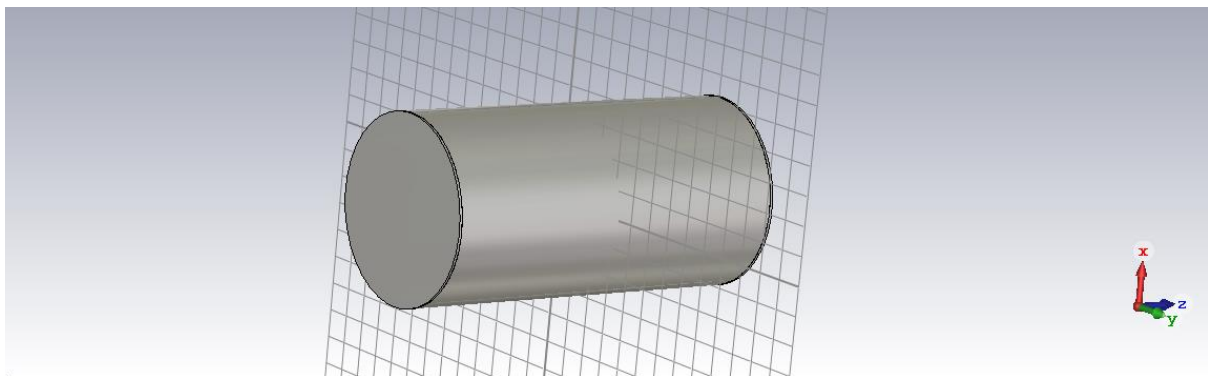




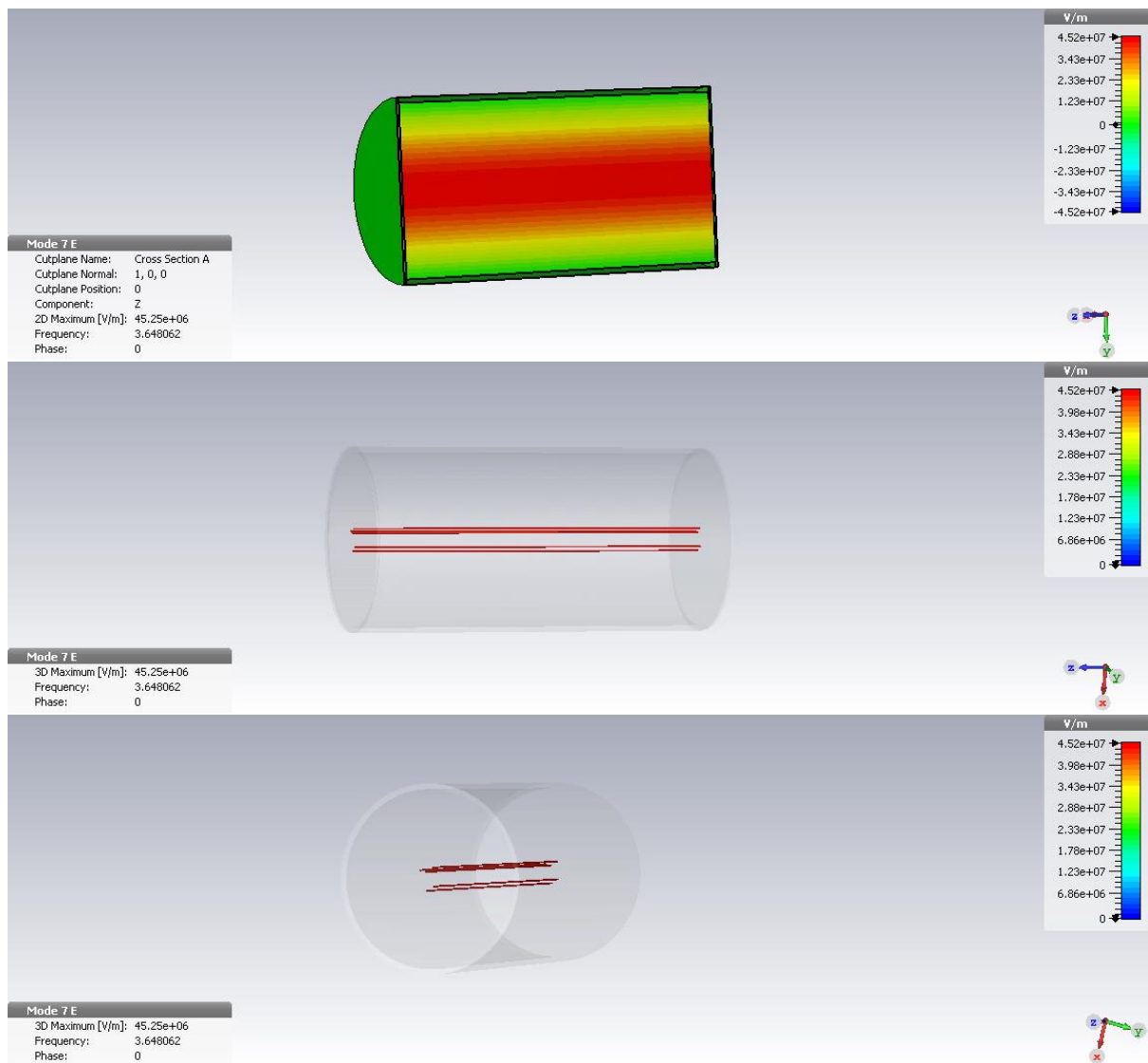
Εικόνα 4.2 – Ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό του αντηχείου κατά τον άξονα  $Z$  ( $f = 3.437 \text{ GHz}$ )

Σε αυτήν την προσομοίωση ο ρυθμός  $TM_{010}$  βρέθηκε ότι διαδίδεται στην συχνότητα  $f = 3.437 \text{ GHz}$ , η οποία είναι αρκετά κοντά στην συχνότητα  $f = 3.651 \text{ GHz}$  που υπολογίστηκε μαθηματικά. Επίσης, είναι εμφανές πως το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργεί ο ρυθμός αυτός στο εσωτερικό του αντηχείου είναι μέγιστο κατά τον άξονα  $Z$ , δηλαδή μέγιστο κατά μήκος του αντηχείου και στο κέντρο του, όπως είχε αναφερθεί στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.

## 2. Κατασκευή Αντηχείου με υλικό PEC



Εικόνα 4.3 – Αντηχείο κατασκευασμένο με PEC



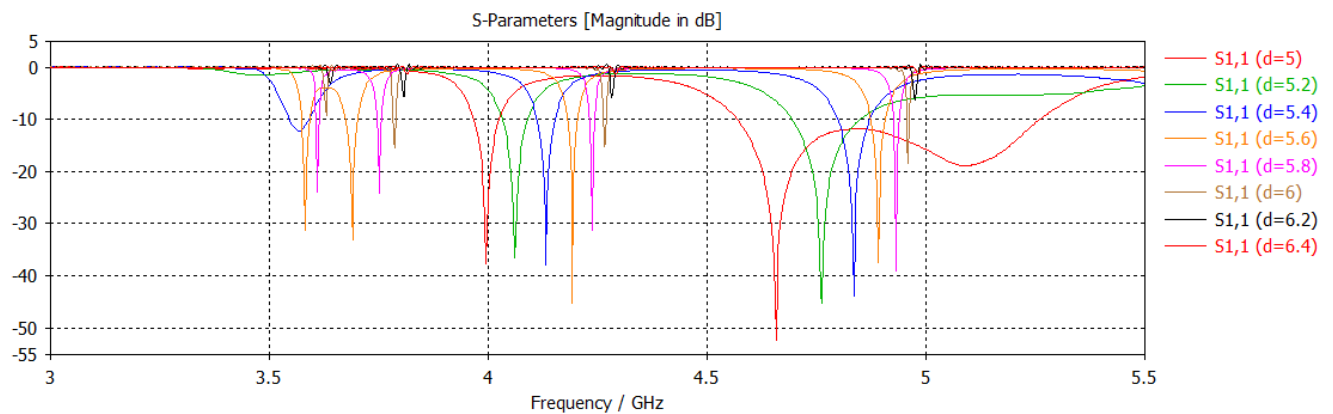
Εικόνα 4.4 – Ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό του αντηχείου κατά τον άξονα Z ( $f = 3.648 \text{ GHz}$ )

Στην προσομοίωση αυτή ο ρυθμός  $TM_{010}$  βρέθηκε ότι διαδίδεται στην συχνότητα  $f = 3.648 \text{ GHz}$ , η οποία είναι σχεδόν η ίδια με την συχνότητα  $f = 3.651 \text{ GHz}$  που υπολογίστηκε μαθηματικά.

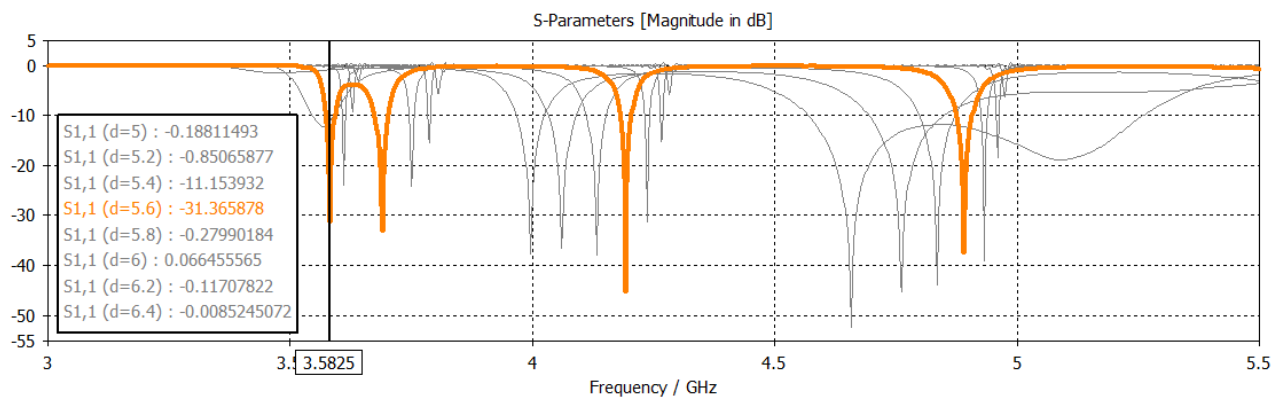
Τα αποτελέσματα και των δύο αυτών προσομοιώσεων είναι πολύ κοντά στα θεωρητικά αποτελέσματα καθώς και στις δύο περιπτώσεις το πεδίο του ρυθμού είναι σωστό και οι συχνότητες συντονισμού πολύ κοντά στην συχνότητα που υπολογίστηκε, με την δεύτερη προσομοίωση να την προσεγγίζει καλύτερα.

Το επόμενο στάδιο του σχεδιασμού του κυλινδρικού αντηχείου ήταν η σχεδίαση των SMA connectors πάνω στο αντηχείο και η εύρεση του μεγέθους των προβόλων με στόχο την βέλτιστη διέγερση του επιθυμητού ρυθμού. Για τον σκοπό αυτό έγινε μια παραμετρική προσομοίωση με την βοήθεια του εργαλείου “Time Domain Solver” που παρέχει το CST. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται παρακάτω.

## Time Domain Solver για την εύρεση ιδανικού μήκους προβόλων



Εικόνα 4.5 –  $S_{11}$  παράμετροι για διάφορα μήκη προβόλων



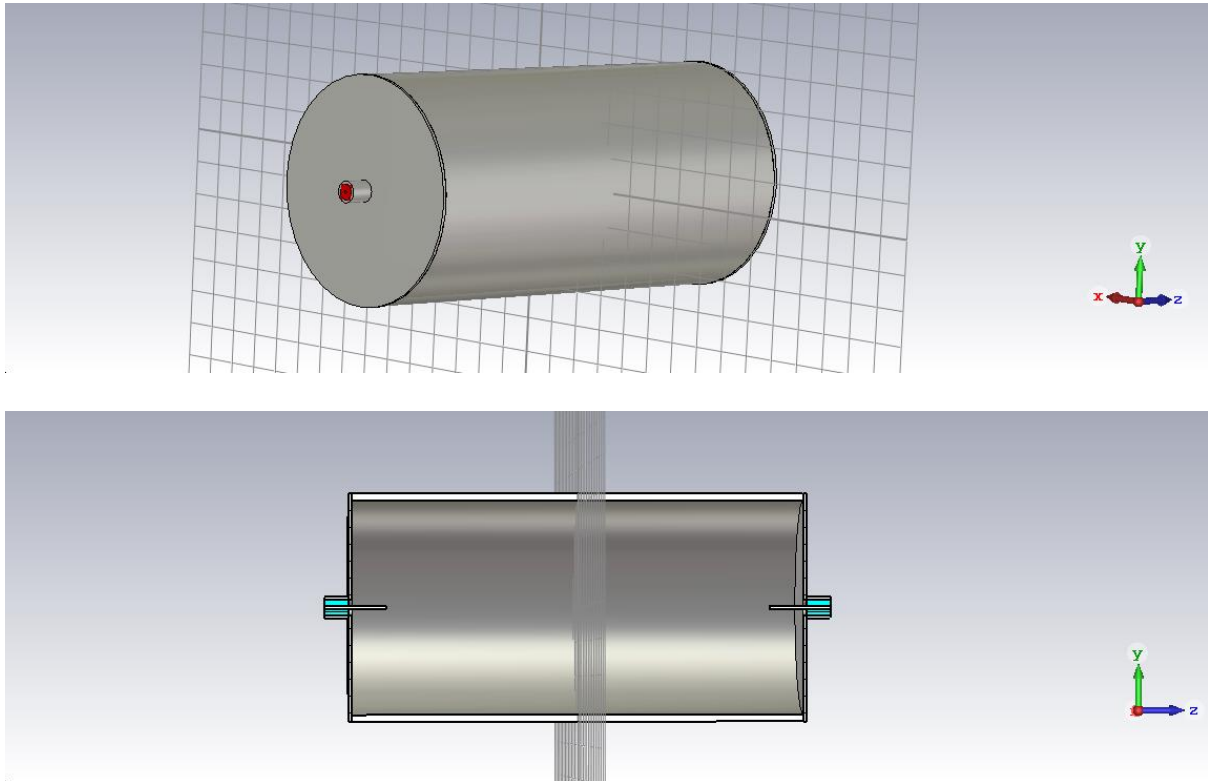
Εικόνα 4.6 –  $S_{11}$  παράμετρος αντηχείου για προβόλους μήκους  $l = 1 \text{ cm}$  ( $d = 5.6$ )

Στην προσομοίωση αυτή βρέθηκε πως το μήκος των προβόλων για το οποίο έχουμε διέγερση εντός του αντηχείου του ρυθμού  $TM_{010}$  και ταυτόχρονα τον οξύτερο συντονισμό είναι αυτό που αντιστοιχεί στην τιμή  $d = 5.6$  της παραμετρικής μεταβλητής, δηλαδή μήκος  $l = 1 \text{ cm}$ . Η συχνότητα συντονισμού του επιθυμητού ρυθμού για το μήκος αυτό βρέθηκε ίση με  $f = 3.5825 \text{ GHz}$ , δηλαδή μετατοπισμένη σε σχέση με την συχνότητα συντονισμού που είχε προκύψει στις προσομοιώσεις με το εργαλείο “Eigenmode Solver”. Για τις προσομοιώσεις, η ακτίνα του προβόλου ορίστηκε ως  $a = 0.05 \text{ cm}$ , όσο ήταν και η ακτίνα του σύρματος που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των προβόλων.

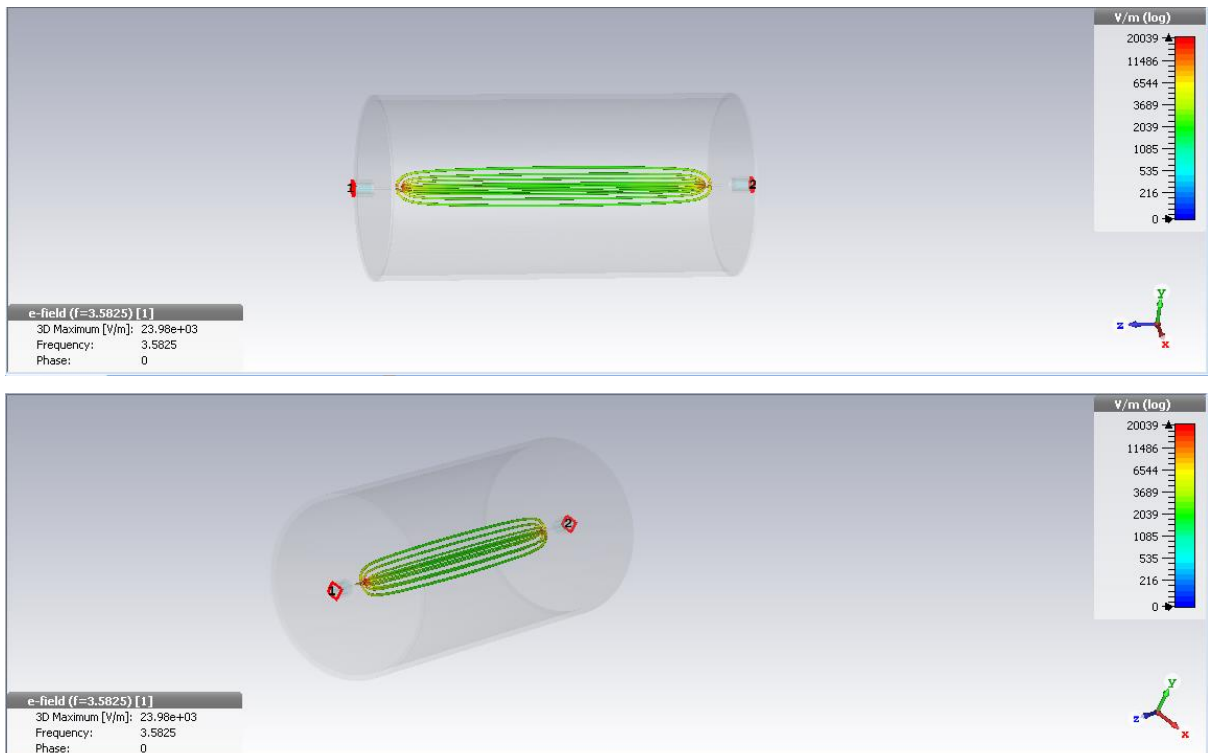
Αφού λοιπόν καθορίστηκε και το σωστό μέγεθος των προβόλων, υλοποιήθηκαν στην συνέχεια πέντε ακόμα προσομοιώσεις με το εργαλείο “Time Domain Solver”. Οι προσομοιώσεις αυτές περιλάμβαναν προσομοίωση του κενού αντηχείου, προσομοίωση του αντηχείου με την βάση για τους ξηρούς καρπούς τοποθετημένη στο εσωτερικό του και προσομοίωση του αντηχείου με την βάση και τρεις διαφορετικές περιπτώσεις ξηρών καρπών στο εσωτερικό του. Στόχος των προσομοιώσεων αυτών ήταν η εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων σχετικά με τον τρόπο που επηρεάζονται η συχνότητα συντονισμού και οι  $S_{11}$  και  $S_{21}$  παράμετροι του αντηχείου όταν στο εσωτερικό του τοποθετείται η βάση των ξηρών καρπών και τρεις ξηροί καρποί με διαφορετικά ποσοστά υγρασίας, δηλαδή με διαφορετικές διηλεκτρικές σταθερές. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνονται παρακάτω.

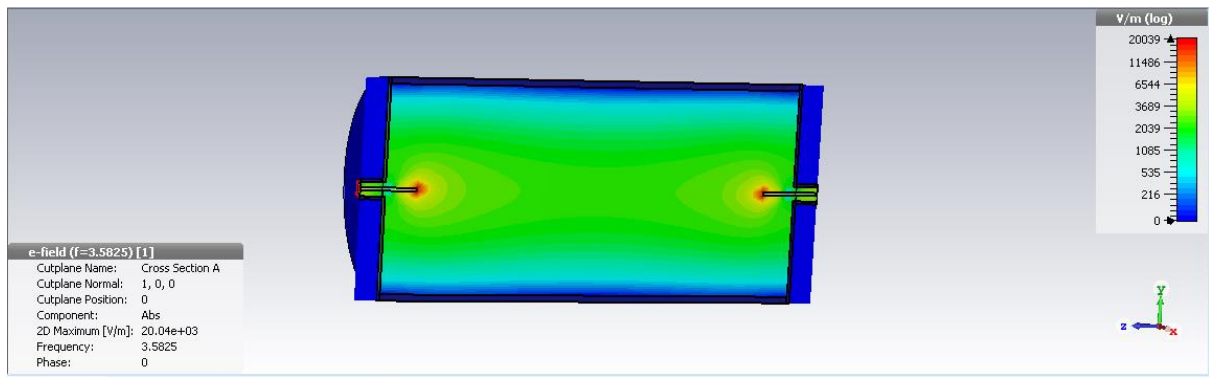
## Time Domain Solvers

### 1. Κενό αντηχείο

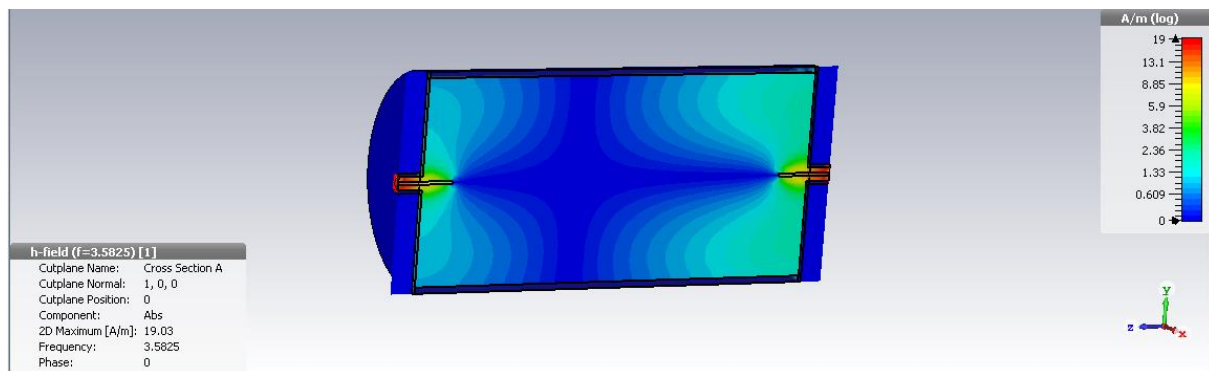


Εικόνα 4.7 - Πλαϊνή όψη και τομή του αντηχείου

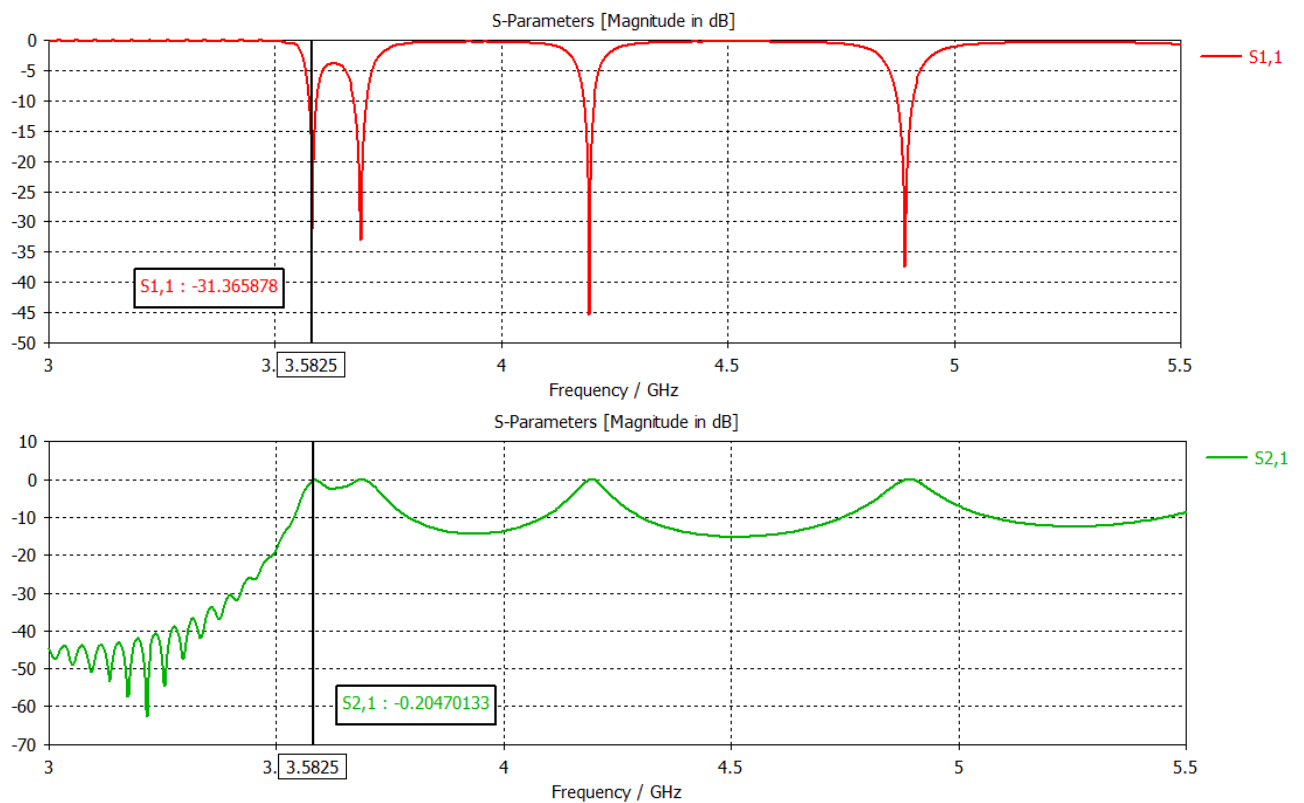




Εικόνα 4.8 - Ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό του αντηχείου κατά τον άξονα Z ( $f = 3.5825 \text{ GHz}$ )



Εικόνα 4.9 - Μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του αντηχείου ( $f = 3.5825 \text{ GHz}$ )

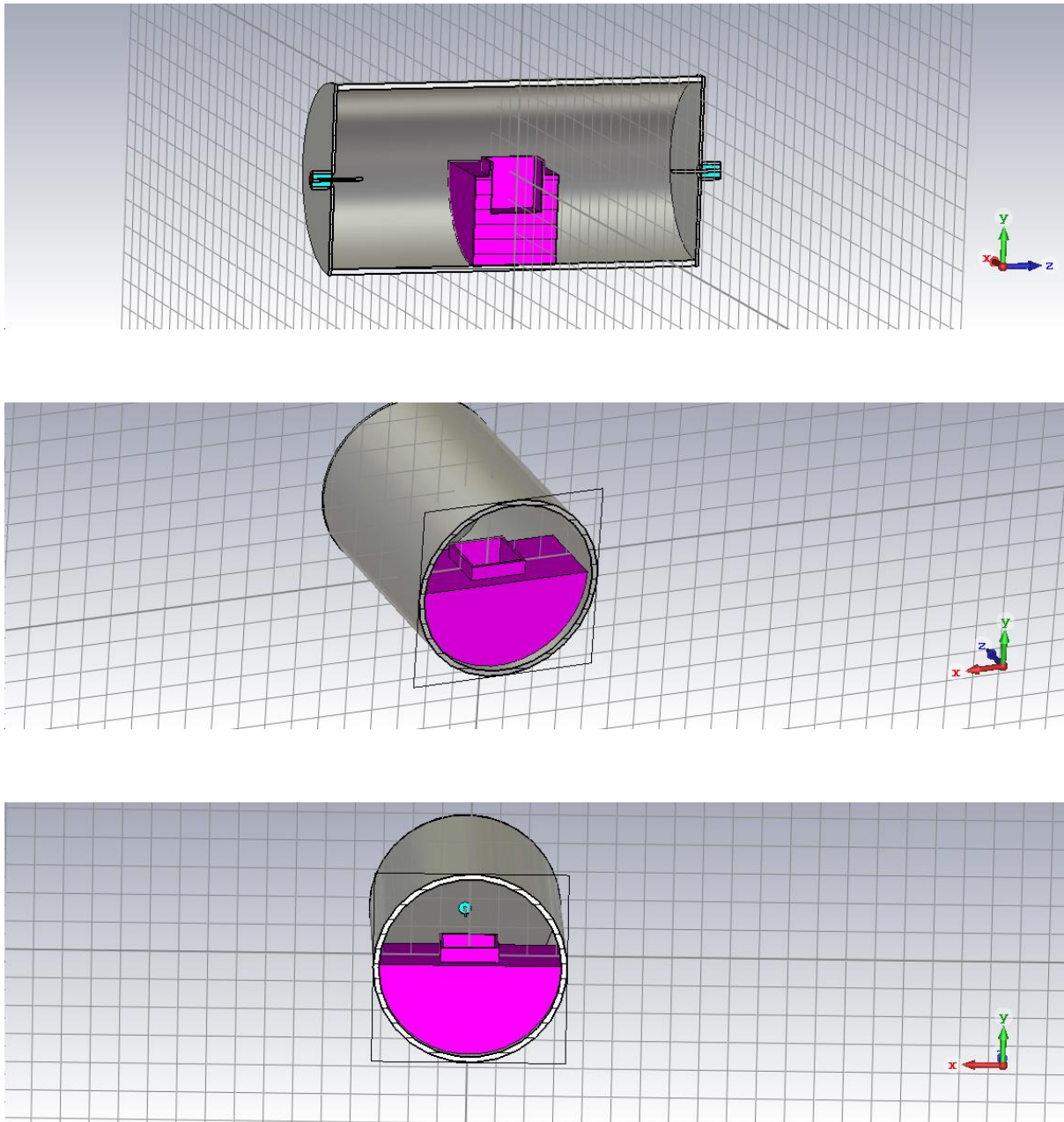


Εικόνα 4.10 -  $S_{11}$  και  $S_{21}$  παράμετροι του κενού αντηχείου ( $f = 3.5825 \text{ GHz}$ )

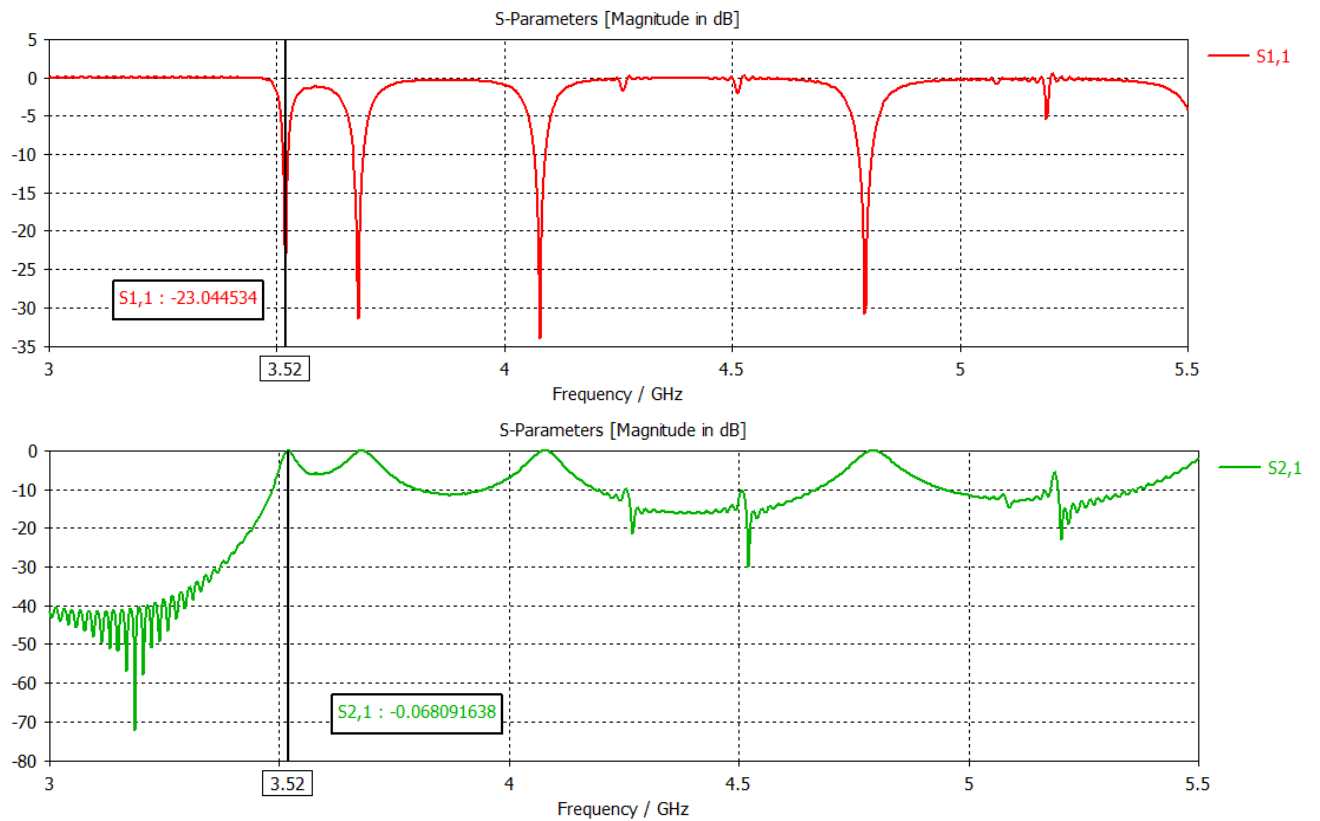
Στην προσομοίωση αυτή, όπως είναι φανερό, η συχνότητα συντονισμού του επικρατέστερου ρυθμού, δηλαδή του ρυθμού  $TM_{010}$  είναι  $f = 3.5825 \text{ GHz}$ , όπως ακριβώς προέκυψε και από την προηγούμενη προσομοίωση για τους προβόλους.

## 2. Αντηχείο με βάση καρπού στο εσωτερικό του

Στην προσομοίωση αυτή τοποθετήθηκε η βάση των καρπών με  $\epsilon_r = 1.5$  εντός του αντηχείου.



Εικόνα 4.11 - Τομές του αντηχείου με την βάση των ξηρών καρπών τοποθετημένη στο εσωτερικό του

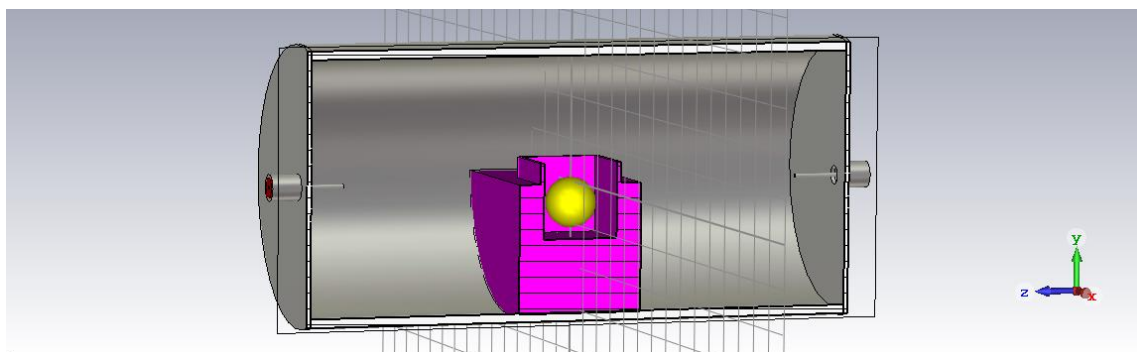


Εικόνα 4.12 -  $S_{11}$  και  $S_{21}$  παράμετροι του αντηχείου ( $f = 3.52 \text{ GHz}$ )

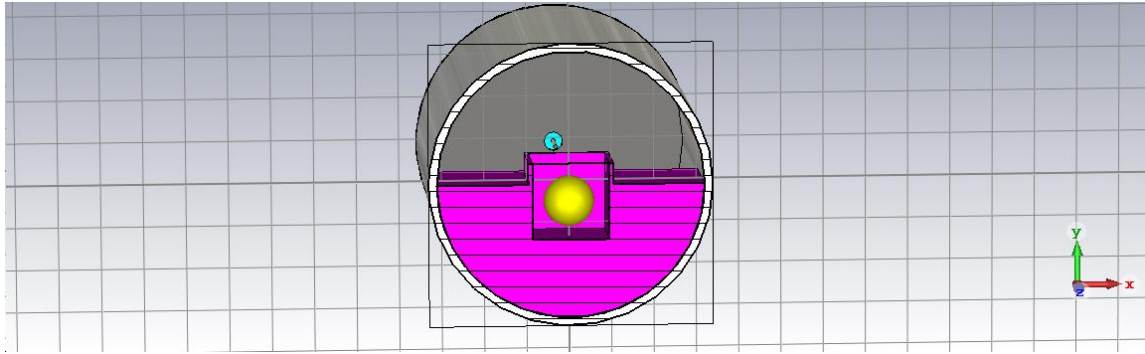
Βλέποντας τα διαγράμματα των  $S_{11}$  και  $S_{21}$  παραμέτρων γίνεται φανερό πως η τοποθέτηση της βάσης των ξηρών καρπών στο εσωτερικό του κυλινδρικού αντηχείου μετατόπισε την συχνότητα συντονισμού προς τα αριστερά κατά  $62.5 \text{ MHz}$  στην  $f = 3.52 \text{ GHz}$  και μετέβαλε τις  $S_{11}$  και  $S_{21}$  παραμέτρους.

3. Αντηχείο με βάση καρπού και τον 1<sup>ο</sup> καρπό στο εσωτερικό του

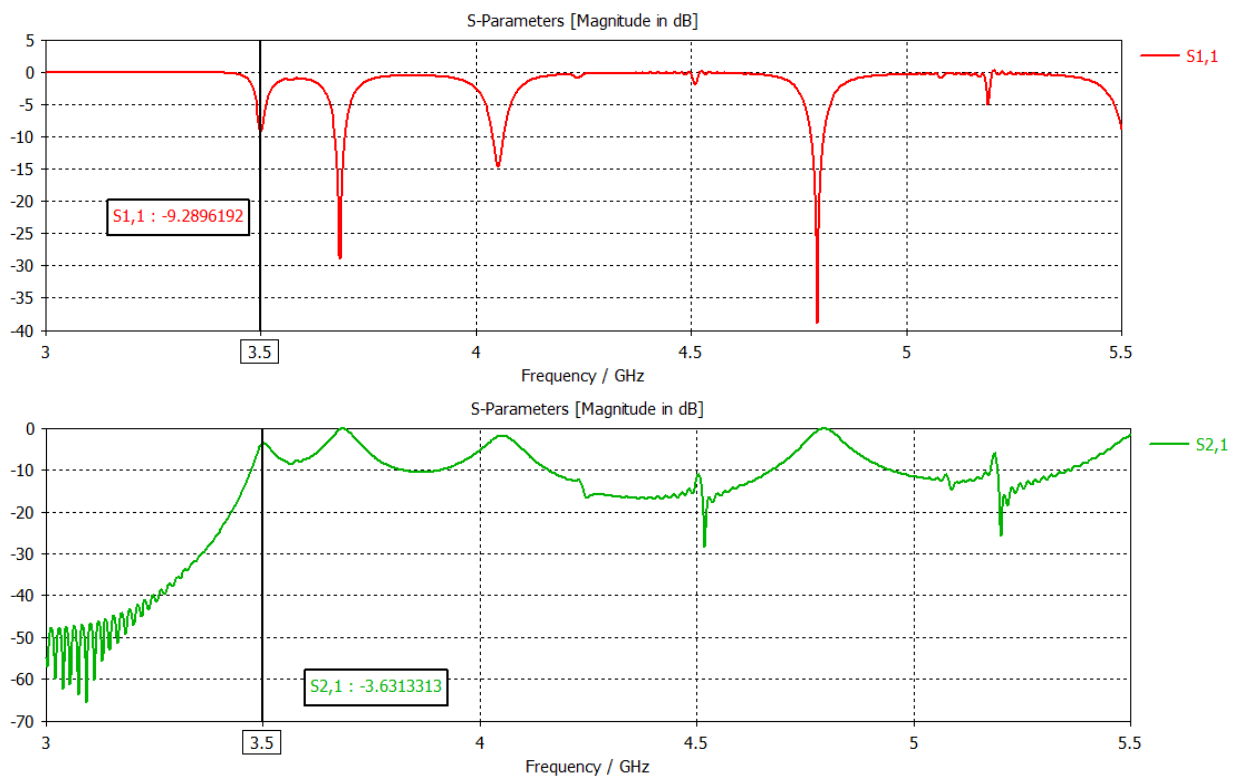
Στην προσομοίωση αυτή τοποθετήθηκε ένας καρπός ακτίνας  $6 \text{ mm}$ ,  $\epsilon_r = 3$ ,  $\sigma = 0.2$  εντός της βάσης.







Εικόνα 4.13 - Τομές του αντηχείου με την βάση και τον ξηρό καρπό στο εσωτερικό του



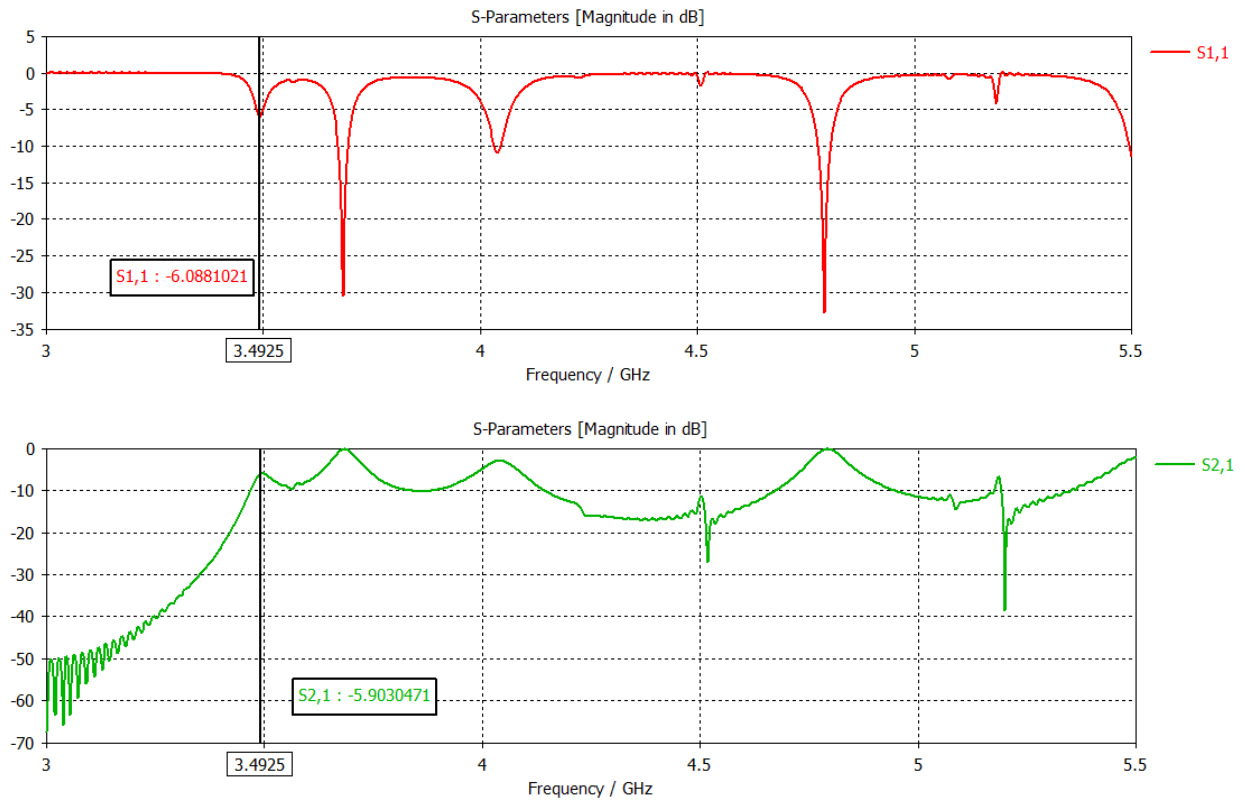
Εικόνα 4.14 -  $S_{11}$  και  $S_{21}$  παράμετροι του αντηχείου ( $f = 3.5 \text{ GHz}$ )

Η τοποθέτηση του συγκεκριμένου καρπού, όπως γίνεται φανερό από τα διαγράμματα, μετατόπισε την συχνότητα συντονισμού στην  $f = 3.5 \text{ GHz}$ . Επίσης, η  $S_{11}$  παράμετρος αυξήθηκε και η  $S_{21}$  μειώθηκε.



#### 4. Αντηχείο με βάση καρπού και τον 2<sup>ο</sup> καρπό στο εσωτερικό του

Στην προσομοίωση αυτή τοποθετήθηκε ένας καρπός ακτίνας  $6mm$ ,  $\epsilon_r = 4$ ,  $\sigma = 0.5$  εντός της βάσης.

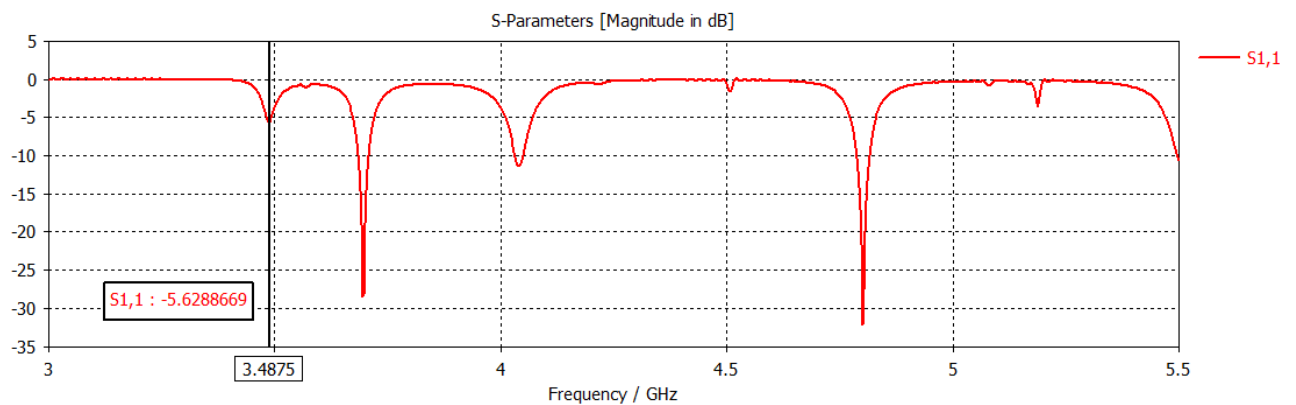


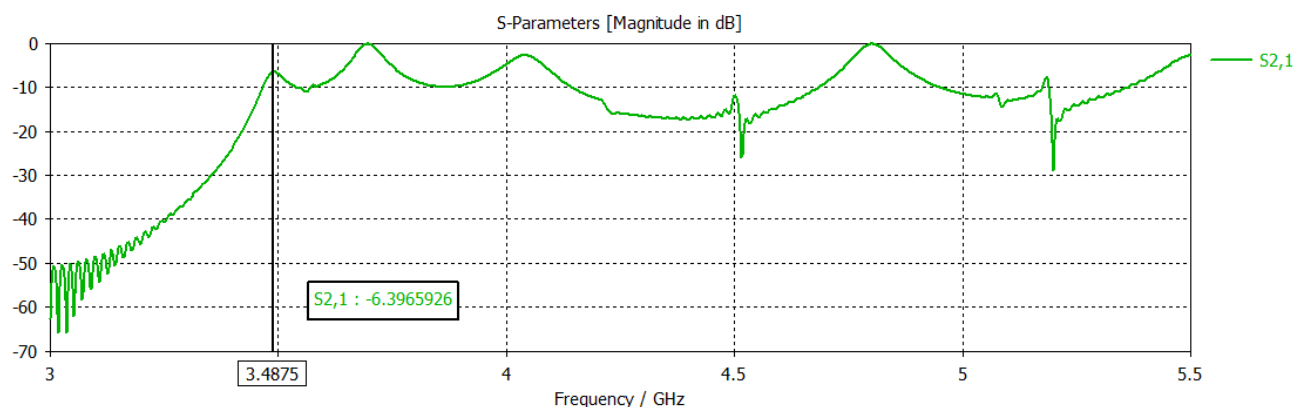
Εικόνα 4.15 -  $S_{11}$  και  $S_{21}$  παράμετροι του αντηχείου ( $f = 3.4925$  GHz)

Η τοποθέτηση του συγκεκριμένου καρπού, όπως γίνεται φανερό από τα διαγράμματα, μετατόπισε την συχνότητα συντονισμού στην  $f = 3.4925$  GHz. Επίσης, η  $S_{11}$  παράμετρος αυξήθηκε και η  $S_{21}$  μειώθηκε.

#### 5. Αντηχείο με βάση καρπού και τον 3<sup>ο</sup> καρπό στο εσωτερικό του

Στην προσομοίωση αυτή τοποθετήθηκε ένας καρπός ακτίνας  $6mm$ ,  $\epsilon_r = 6$ ,  $\sigma = 0.8$  εντός της βάσης.





Εικόνα 4.16 -  $S_{11}$  και  $S_{21}$  παράμετροι του αντηχείου ( $f = 3.4875 \text{ GHz}$ )

Η τοποθέτηση του συγκεκριμένου καρπού, όπως γίνεται φανερό από τα διαγράμματα, μετατόπισε την συχνότητα συντονισμού στην  $f = 3.4875 \text{ GHz}$ . Επίσης, η  $S_{11}$  παράμετρος αυξήθηκε και η  $S_{21}$  μειώθηκε.

Συγκεντρωτικά, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Προσομοιώσεις	Συχνότητα συντονισμού ( $f$ )	Μετατόπιση συχνότητας ( $\Delta f$ )	$S_{11}$	$S_{21}$
Κενό αντηχείο	3.5825 GHz	0 MHz	-31.3658 dB	-0.2047 dB
Αντηχείο με βάση ( $\epsilon_r = 1.5$ )	3.52 GHz	62.5 MHz	-23.0445 dB	-0.0681 dB
Αντηχείο με βάση και 1 <sup>ο</sup> καρπό ( $\epsilon_r = 3, \sigma = 0.2$ )	3.5 GHz	82.5 MHz	-9.2896 dB	-3.6313 dB
Αντηχείο με βάση και 2 <sup>ο</sup> καρπό ( $\epsilon_r = 4, \sigma = 0.5$ )	3.4925 GHz	90 MHz	-6.0881 dB	-5.903 dB
Αντηχείο με βάση και 3 <sup>ο</sup> καρπό ( $\epsilon_r = 6, \sigma = 0.8$ )	3.4875 GHz	95 MHz	-5.6288 dB	-6.3966 dB

Παρατηρώντας λοιπόν τα διαγράμματα των προσομοιώσεων και τον πίνακα των αποτελεσμάτων, το συμπέρασμα που εξάγεται είναι πως η αύξηση του ποσοστού υγρασίας του καρπού που εισάγεται εντός του αντηχείου, δηλαδή η αύξηση της διηλεκτρικής σταθεράς του, έχει ως αποτέλεσμα την μετατόπιση της συχνότητας συντονισμού προς χαμηλότερες τιμές, την μείωση της παραμέτρου  $S_{11}$  και την αύξηση της  $S_{21}$ .

## 4. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΝΤΗΧΕΙΟΥ

---

Για την κατασκευή του μεταλλικού κυλινδρικού αντηχείου χρησιμοποιήθηκαν τα υλικά και εργαλεία που φαίνονται στις ακόλουθες εικόνες.

1. Χαλκοσωλήνας, Μήκος 25 cm, Διάμετρος 6.29cm



2. Χάλκινα Καπάκια



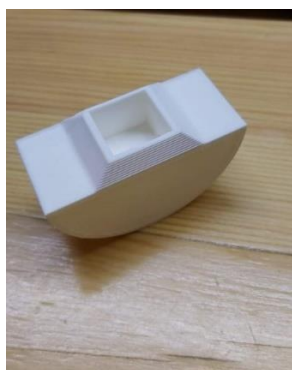
3. SMA connectors



4. Πλαστικά Καπάκια κατασκευασμένα σε 3D Printer



5. Πλαστική Βάση  
Ξηρού Καρπού  
κατασκευασμένη  
σε 3D Printer



6. Κολλητήρι για  
καλάι



7. Παχύμετρο



8. Σμυριδόπανο



9. Γυαλόχαρτο



10. Κόλλα



Διαδικασία Κατασκευής Κυλινδρικού Αντηχείου



Στο πρώτο στάδιο της κατασκευής κόπηκε από τον αρχικό χαλκοσωλήνα ένα κομμάτι μήκους  $13.2\text{cm}$ .



Έπειτα τα χάλκινα καπάκια λειάνθηκαν περιμετρικά με την βοήθεια ενός σμυριδόπανου και ενός γυαλόχαρτου ώστε να αποκτήσουν κυκλικό σχήμα και τρυπήθηκαν στο κέντρο τους με τρυπάνι.



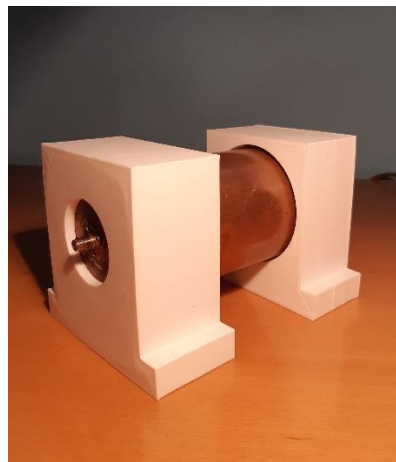
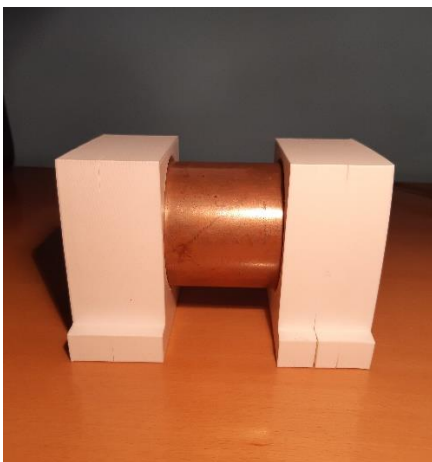
Στην συνέχεια, κολλήθηκαν με καλαί οι πρόβολοι μήκους  $l = 1\text{ cm}$  πάνω στους SMA κονέκτορες και έπειτα οι SMA κονέκτορες κολλήθηκαν, επίσης με καλαί, στο κέντρο των χάλκινων καπακιών.



Στο επόμενο στάδιο της διαδικασίας κολλήθηκε η πλαστική βάση για τους ξηρούς καρπούς στο εσωτερικό του χαλκοσωλήνα και στο κέντρο του καθώς επίσης και τα χάλκινα καπάκια στο εσωτερικό των πλαστικών καπακιών με την χρήση κόλλας.



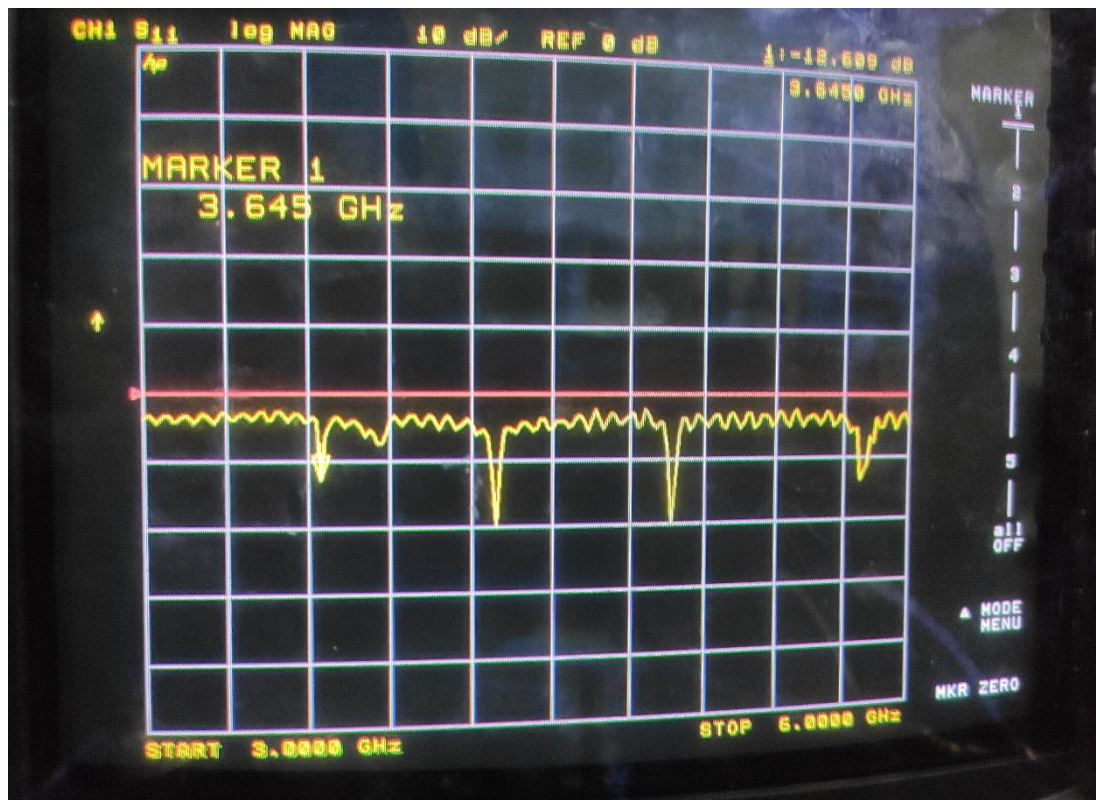
Στο τέλος της διαδικασίας τοποθετήθηκαν τα καπάκια στις άκρες του χαλκοσωλήνα και η συνολική εικόνα του μεταλλικού κυλινδρικού αντηχείου ήταν η παρακάτω.



## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο με τη χρήση του αναλυτή δικτύου. Αρχικά παρουσιάζονται παρακάτω τα αποτελέσματα από τη μέτρηση του κενού αντηχείου χωρίς τη βάση για την τοποθέτηση καρπών. Οι συντονισμοί οι οποίοι φαίνονται από το διάγραμμα **S11** είναι οι:

- 3.645 GHz      -12.63 db
- 4.290 GHz      -17.75 db
- 4.960 GHz      -18.05 db
- 5.776 GHz      -13.12 db

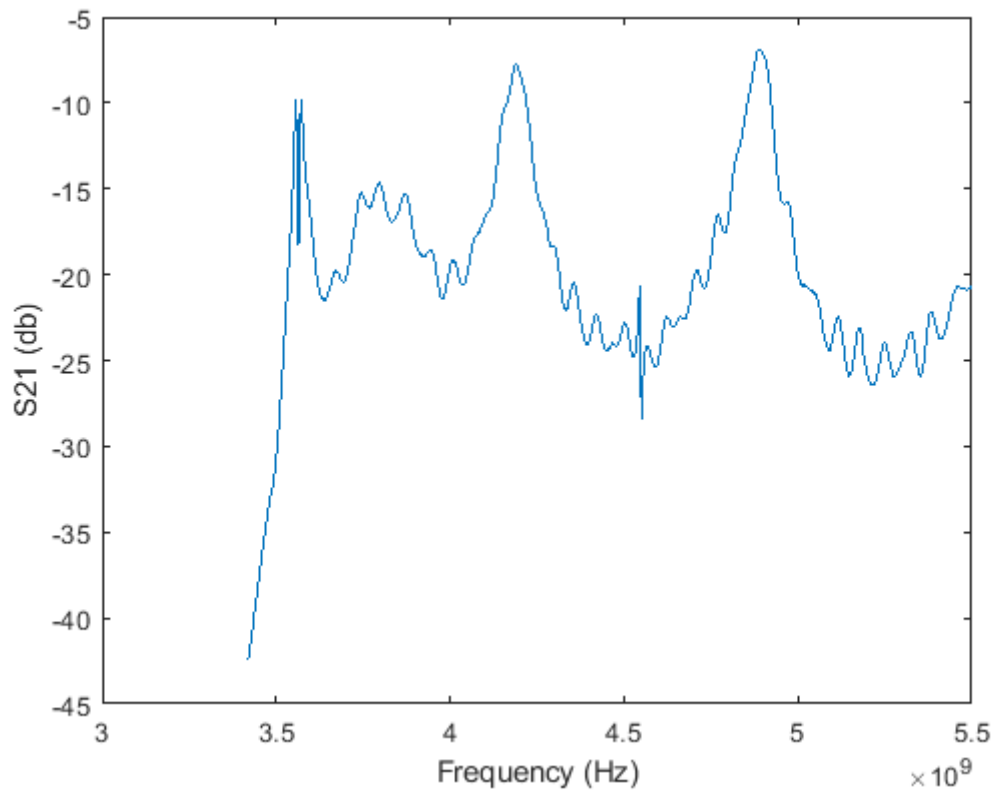


Εικόνα 5.1 - Κενό Αντηχείο - S11

Παρατηρείται ότι η πρώτη συχνότητα συντονισμού είναι 3.645 GHz και είναι περίπου ίση με τη συχνότητα συντονισμού (3.58 GHz) του πρώτου ρυθμού που υπολογίσθηκε αλλά και επιβεβαιώθηκε μέσω του CST.

Στη συνέχεια μετρήθηκε το αντηχείο μόνο με την τοποθετημένη-κολλημένη βάση του καρπού η οποία βρίσκονταν εντός του αντηχείου. Κατόπιν έγινε δειγματοληψία και πάρθηκαν τα αποτελέσματα και επεξεργάσθηκαν στο MATLAB. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το διάγραμμα S21. Οι συχνότητες συντονισμού ήταν:

- 3.5721 GHz      -9.860840 db
- 3.7970 GHz      -14.647950 db
- 4.1909 GHz      -7.746338 db
- 4.8903 GHz      -6.843506 db

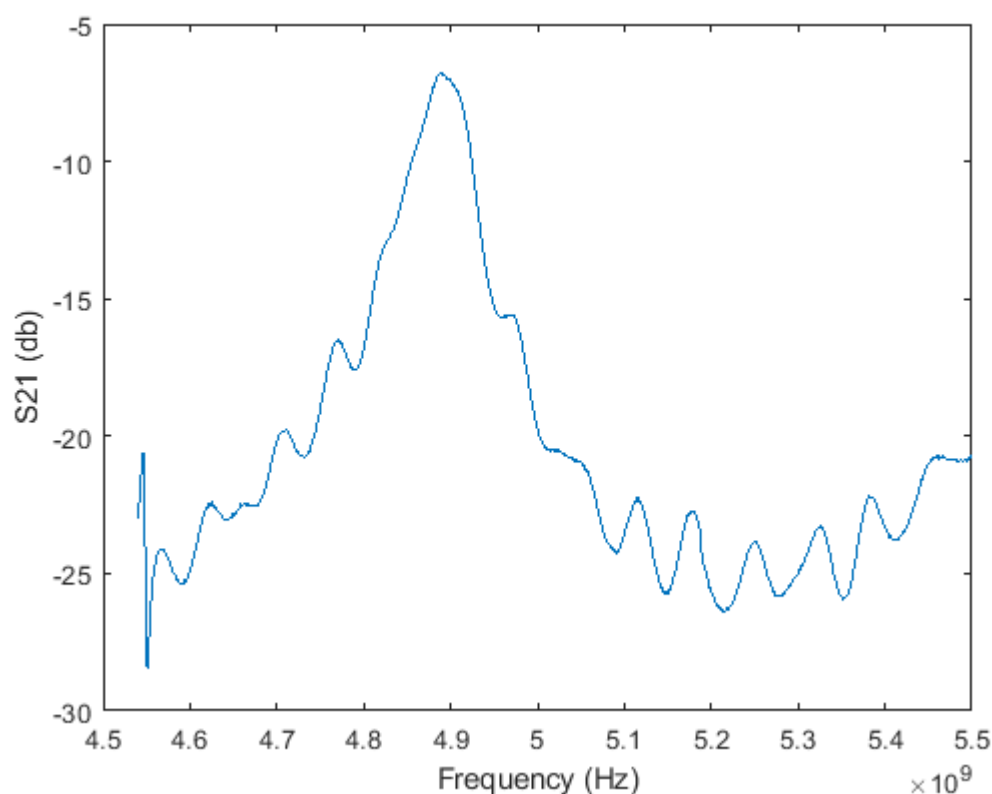


Εικόνα 5.2 - Απόκριση  $S_{21}$  κενού αντηχείου με βάση

Από την παραπάνω εικόνα γίνεται αντιληπτό ότι η τοποθέτηση της πλαστικής θήκης έχει επηρεάσει ελάχιστα το αντηχείο και έχει μετατοπίσει λίγο τις συχνότητες συντονισμού. Επίσης φαίνεται ότι στη συχνότητα 3.57 GHz υπάρχει ο πρώτος συντονισμός ο οποίος συμβαδίζει τόσο με τα αποτελέσματα του CST όσο και με τα μαθηματικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Τέλος, φαίνεται ότι ο πιο απότομος συντονισμός παρατηρείται στη συχνότητα 4.89 GHz και επομένως είναι ο συντονισμός που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα.

Εφόσον επιλέχθηκε ο τέταρτος συντονισμός έγινε πιο αναλυτική μέτρηση στην περιοχή αυτή τα αποτελέσματα της οποίας φαίνονται παρακάτω. Συγκεκριμένα, ο συντονισμός του αντηχείου υπολογίστηκε ίσος με  $f_0 = 4.8892 \text{ GHz}$  και το  $S_{21} = -6.758545 \text{ db}$ , ενώ το Bandwidth υπολογίστηκε  $BW = 65.4 \text{ MHz}$ . Επομένως, ο συντελεστής ποιότητας του αντηχείου στο σημείο αυτό είναι  $Q_0 = \frac{f}{BW} = 74.758410 \frac{\text{GHz}}{\text{db}}$ .





Εικόνα 5.3 - S21 Απόκριση κενού αντηχείου στην περιοχή του 4ου συντονισμού

Στο σημείο αυτό έχει χαρακτηριστεί πλήρως το αντηχείο και είναι δυνατό να ξεκινήσει η μέτρηση της υγρασίας των καρπών. Το πείραμα που εκτελέστηκε αρχικά αφορούσε την ύγρανση ωμών φιστικιών και κατόπιν το ψήσιμό τους έως την εξάντληση της υγρασίας που αυτά είχαν απορροφήσει. Παράλληλά, καθόλη τη διάρκεια ψησίματος, δείγματα αφαιρούνταν και μετρούνταν το βάρος τους. Με τον τρόπο αυτό υπολογίστηκε σε έναν σχετικά καλό βαθμό η σχετική υγρασία των δειγμάτων. Κατόπιν τα δείγματα αυτά τυλίχτηκαν με αλουμινόχαρτο και συσκευάστηκαν σε αεροστεγή σακουλές για τη μεταφορά τους στο εργαστήριο. Στο εργαστήριο πάρθηκαν 3 τεμάχια από κάθε ομάδα δειγμάτων και μετρήθηκαν.

Αρχικά, συλλέχθηκαν **130** φιστίκια και ζυγίστηκαν ίσα με 129 γραμμάρια (περίπου 9.9 γραμμάρια το φιστίκι), αφού αφαιρέθηκε το βάρος του μπολ. Η ζυγαριά η οποία χρησιμοποιήθηκε είχε ακρίβεια ενός (1) γραμμαρίου, συνεπώς τα επόμενα δείγματα ομάδων θα ήταν σε ομάδες των 10 φιστικιών ώστε να μπορεί να γίνει αναγωγή στη μονάδα.



Στη συνέχεια τα 130 φιστίκια τοποθετήθηκαν σε ένα μεγαλύτερο μπολ με νερό και παρέμειναν μέσα στο νερό για 12 ώρες, προκειμένου να διασφαλισθεί ότι θα έχουν απορροφήσει τη μέγιστη δυνατή υγρασία.

Τα 130 φιστίκια αφαιρέθηκαν από το γεμάτο νερό μπολ. Τυχαία επιλέχθηκαν 10 από αυτά και ζυγίστηκαν ίσα με 20 γραμμάρια.

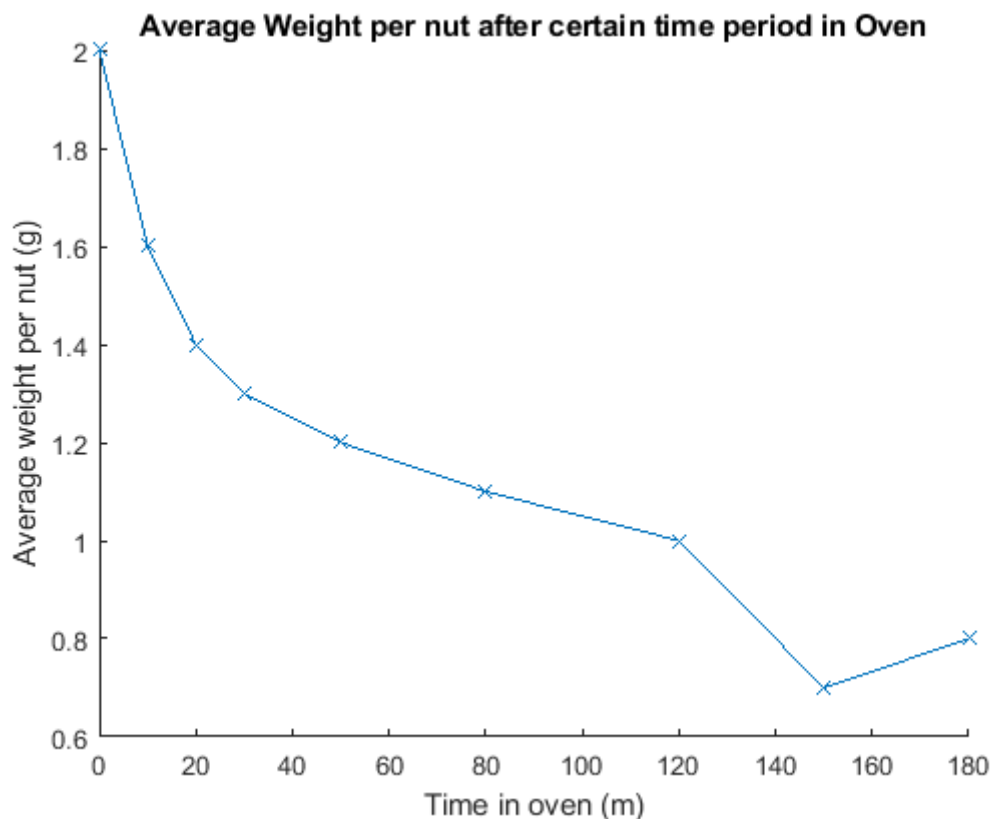
Τα υπόλοιπα φιστίκια τοποθετήθηκαν στο φούρνο περίπου στους 150 βαθμούς κελσίου.

Ανά τακτά χρονικά διαστήματα αφαιρούνταν δέκα φιστίκια από το ταψί και μετριούνταν το βάρος τους. Αναλυτικά φαίνονται τα αποτελέσματα στις παρακάτω εικόνες αλλά και στον αντίστοιχο πίνακα.



Χρόνος στο φούρνο (λεπτά)	Βάρος ανά 10 φιστίκια (γραμμάρια)
0	20
10	16
20	14
30	13
50	12
80	11
120	10
150	7
180	8

Τα παραπάνω μεγέθη ανάχθηκαν στη μονάδα και προέκυψε το παρακάτω γράφημα. Όπως φαίνεται υπάρχουν μικρές διακυμάνσεις αλλά ακολουθείται φθίνουσα πορεία. Αρχικά, το απόλυτα υγρό φιστίκι ζυγίζει περίπου 2 γραμμάρια ενώ το απόλυτα στεγνό περίπου 7.5 γραμμάρια.

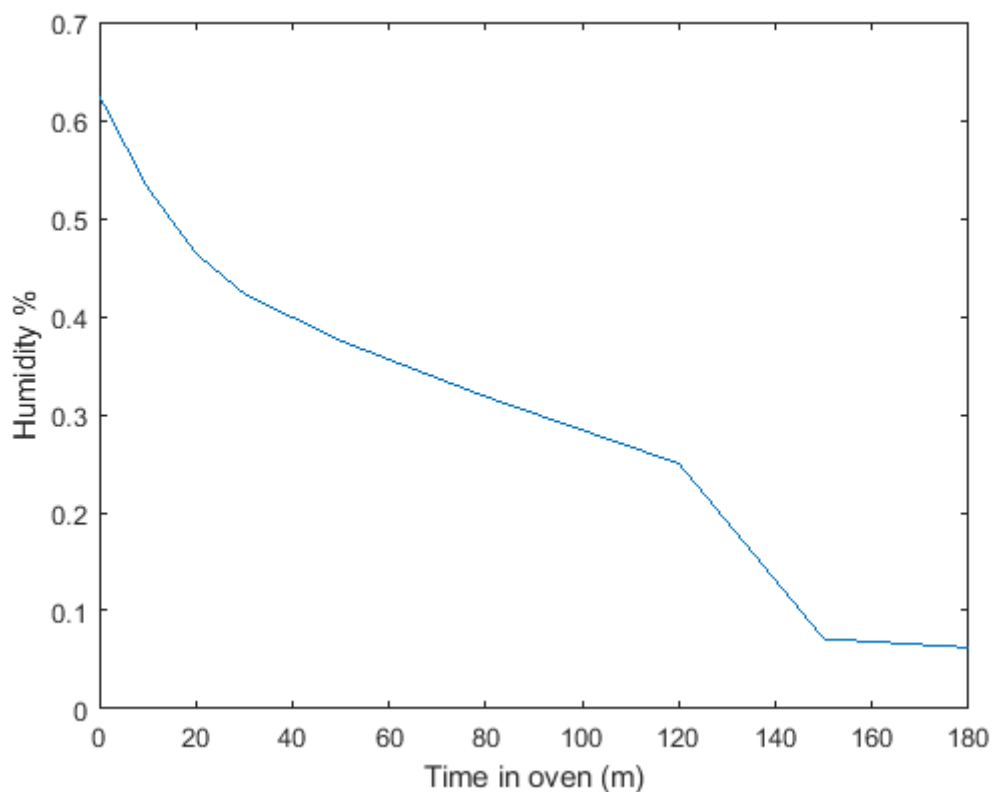


Εικόνα 5.4 - Μέσο βάρος καρπού σε σχέση με το χρόνο ψησίματος

Εφόσον είναι γνωστή η τιμή που ζυγίζει το απόλυτα ξηρό φιστίκι είναι δυνατή και η μέτρηση της σχετικής υγρασίας ακολουθώντας τον τύπο που υπάρχει στις διαφάνειες των παραδόσεων. Δηλαδή:

$$humidity (\%) = \frac{mw}{mw + md} * 100$$

όπου  $mw$ ,  $md$  η μάζα του νερού και η μάζα του ξηρού υλικού αντίστοιχα. Η σχετική υγρασία φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα. Όπως φαίνεται η υγρασία κυμαίνεται από περίπου **65%** για τον απόλυτα υγρό καρπό και ελαττώνεται στην τιμή περίπου **10%** για τον απόλυτα ξηρό καρπό.



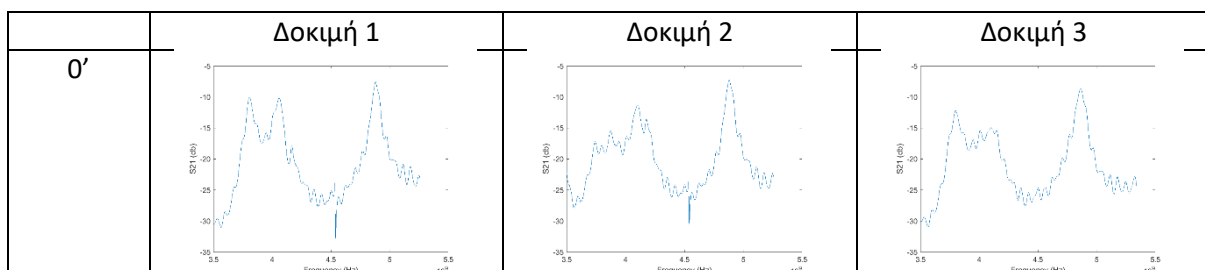
Εικόνα 5.5 - Σχετική υγρασία καρπών σε σχέση με το χρόνο ψησίματος

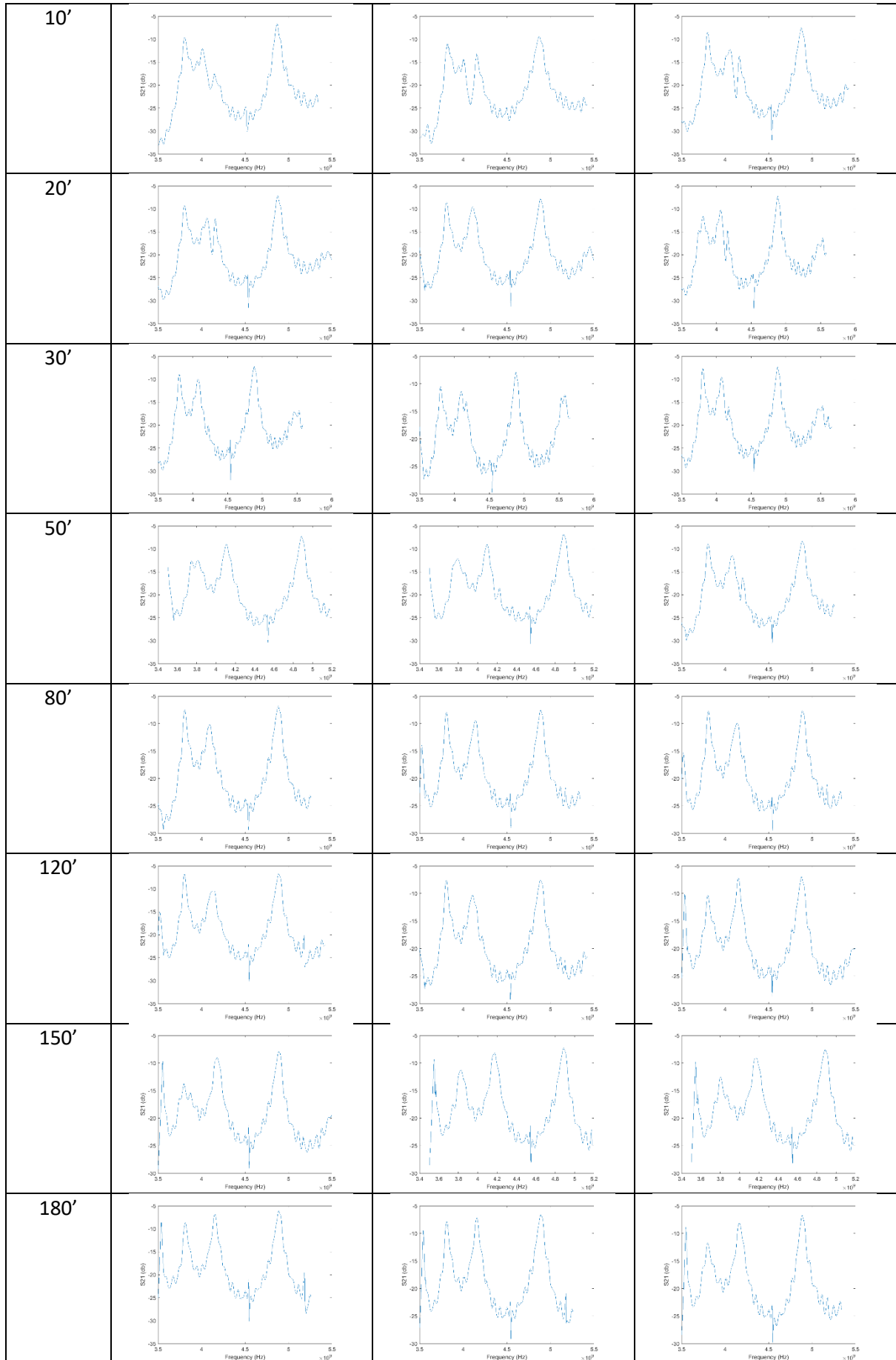
Επειδή οι καρποί που μετρήθηκαν είχαν διαφορετικό μέγεθος και βάρος επιλέχθηκε αρχικά να γίνει η ανάλυση των καρπών σε σχέση με το χρόνο ψηφίσματος ο οποίος ήταν κοινός παράγοντας για όλα τα δείγματα.

Η μεθοδολογία που επιλέχθηκε στη συνέχεια για τα πειράματα ήταν η εξής:

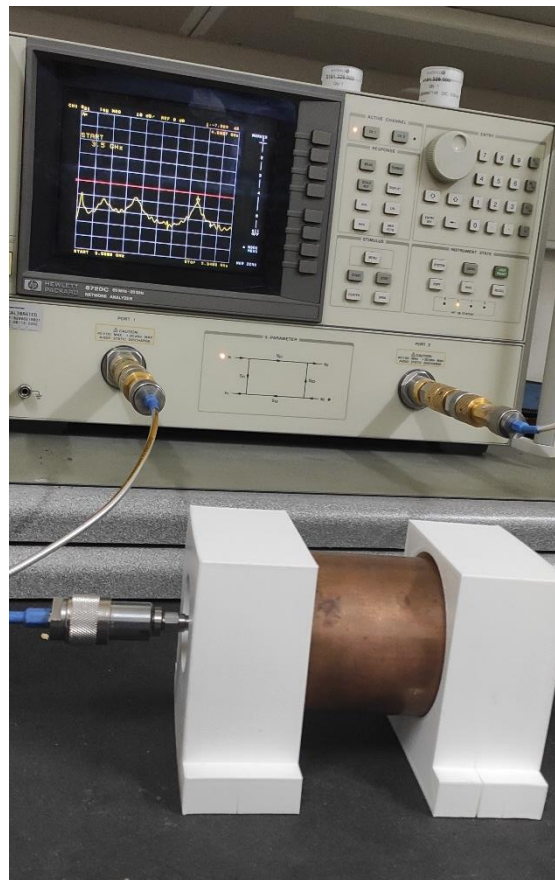
1. Επιλογή τριών (3) τυχαίων καρπών από κάθε ομάδα δείγματος.
2. Μέτρηση του S21 στο εύρος [3.5, 5.5] GHz.
3. Μέτρηση του S21 στο εύρος [4.5, 5.5] GHz για καλύτερο προσδιορισμό της κορυφής του τέταρτου συντονισμού.

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα διαγράμματα στο εύρος [3.5, 5.5] GHz. Στα διαγράμματα αυτά μπορεί να επιβεβαιωθεί η σωστή λειτουργία του αντηχείου για το σύνολο των καρπών καθώς συμπεριφέρεται σωστά για όλα τα δείγματα χωρίς να μεταβάλλεται η μορφή των κυματομορφών S21.





Αναλυτικά δεδομένα για κάθε διάγραμμα και κάθε συντονισμό μπορούν να βρεθούν στο Παράρτημα Α.



Εικόνα 5.6 - Ενδεικτική Εικόνα Μετρήσεων

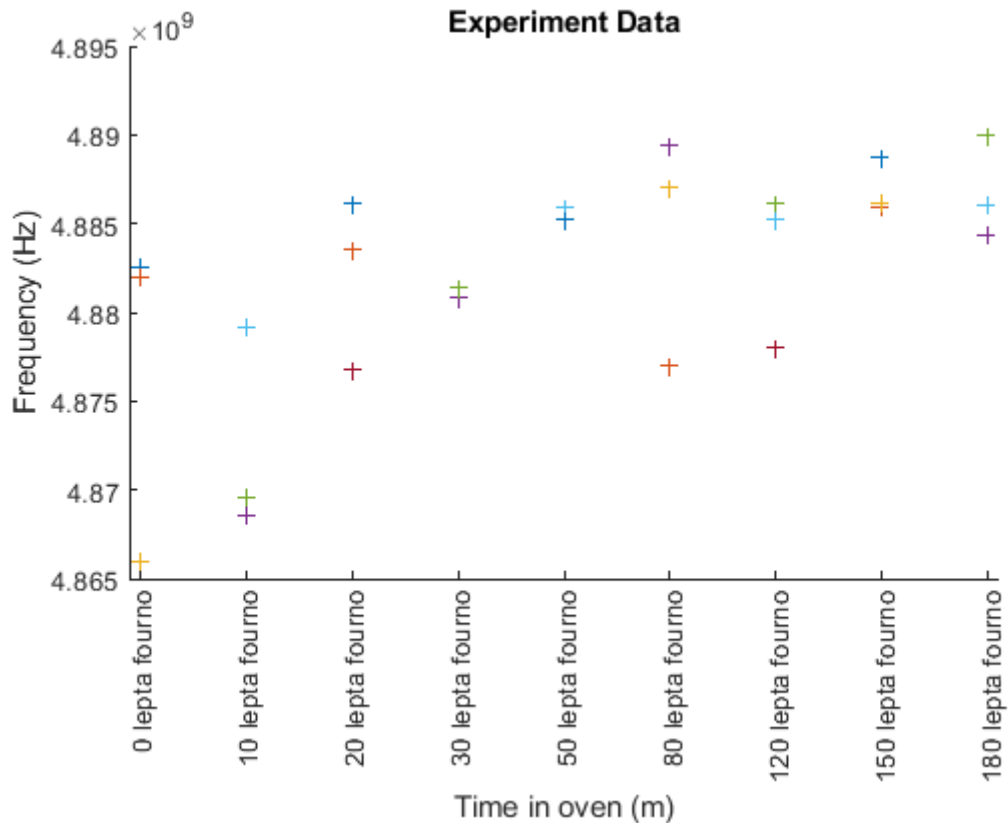
Στο σημείο αυτό έχουν περιγράψει οι κυματομορφές, η μεθοδολογία αλλά και όσες παραδοχές έχουν γίνει. Επομένως, το υπόλοιπο αυτού του κεφαλαίου συγκεντρώνει την προσοχή του στην τέταρτη κορυφή συντονισμού και τα αποτελέσματα που απορρέουν από τα αποτελέσματα που πάρθηκαν στις δοκιμές αναφορικά με την κορυφή αυτή.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι συχνότητες συντονισμού όπως αυτές υπολογίσθηκαν στο MATLAB για κάθε ομάδα δειγμάτων.



Εικόνα 5.7 - Ενδεικτική Εικόνα Μέτρησης 4ης κορυφής





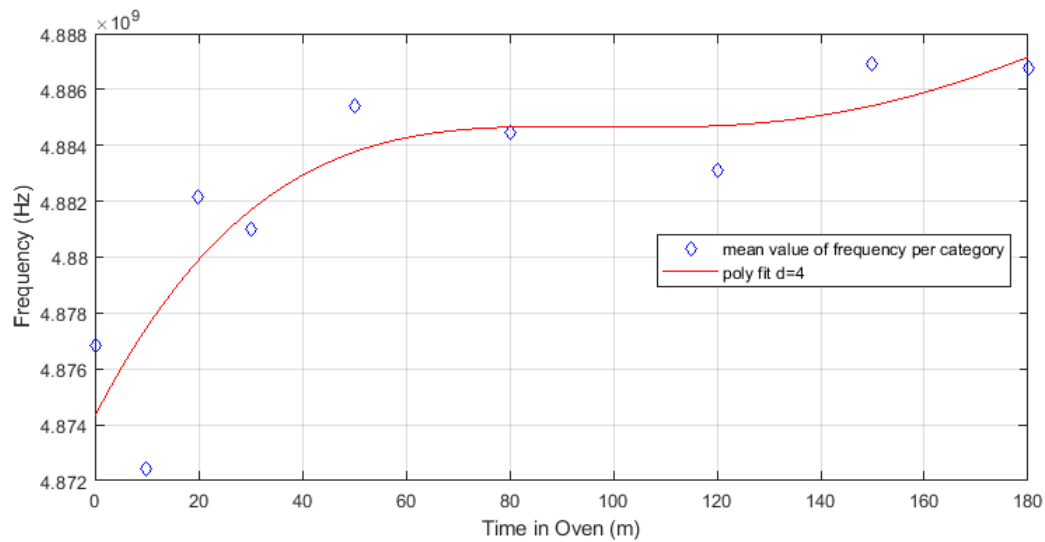
Εικόνα 5.8 - Συχνότητες συντονισμού καρπών ανά ομάδα σε σχέση με το χρόνο ψησίματος

Από το παραπάνω διάγραμμα μπορεί να γίνει εύκολα διακριτό ότι **όσο περισσότερο ξεραινόταν ένας καρπό και έχανε υγρασία τόσο περισσότερο αυξανόταν η συχνότητά του**. Ενδεικτικά το εύρος που κυμαίνονται οι συχνότητες είναι [4.865, 4.89] GHz. Με άλλα λόγια παρατηρείται μία διαφορά εύρους 30 MHz.

Εφόσον παρατηρείται αυτή η τάση από τις μετρήσεις των δειγμάτων μπορεί να υπολογισθεί μία προσεγγιστική πολυωνμική έκφραση η οποία να αντιστοιχεί το χρόνο ψησίματος στους 150 βαθμούς με τη συχνότητα. Η πολυωνμική έκφραση είναι η εξής και κατασκευάστηκε με βάση τη μέση τιμή κάθε κατηγορίας:

$$f(x) = -0.03859 * x^4 + 22.82 * x^3 - 4459 * x^2 + 3.598 * 10^5 * x + 4.874 * 10^9$$

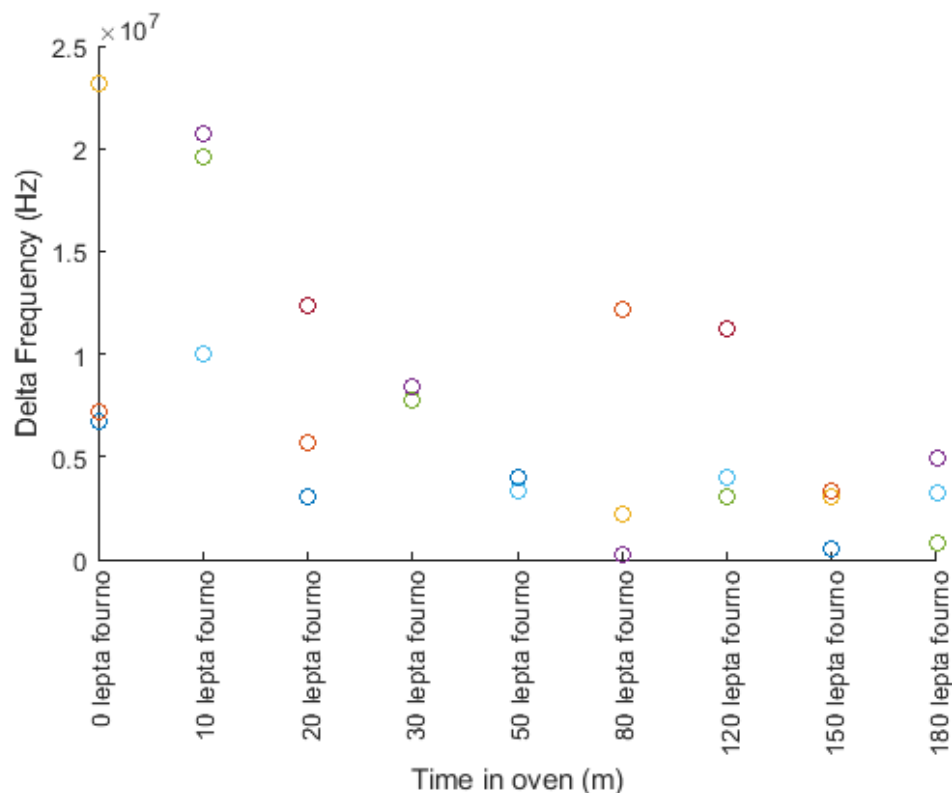
Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η πολυωνμική παράσταση και οι μέση τιμή συχνότητας κάθε κατηγορίας.



Εικόνα 5.9 - Polynomial Fit Curve 4ου βαθμού Μέσης συχνότητας ανά κατηγορία και χρόνο ψησίματος

Η παραπάνω καμπύλη όμως δεν αποτελεί καλή μέθοδο αντιστοίχισης και σύμφωνα με τη θεωρία που αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο μία καλύτερη μετρική αφορά τη διαφορά της συχνότητας των δειγμάτων και την ενέργεια που απορροφούν.

Επομένως, μελετάται αρχικά η διαφορά  $\Delta F = f_s - f_0$  που έχει ένα δείγμα σε σχέση με τη συχνότητα  $f_0$  που έχει το αντηχείο. Οι διαφορές των δειγμάτων ανά κατηγορία παρουσιάζονται παρακάτω. Στην εικόνα παρατηρείται μία καθοδική τάση όσο περισσότερο μένει στο φούρνο ένας καρπός δηλαδή όσο περισσότερο ξηρός είναι.



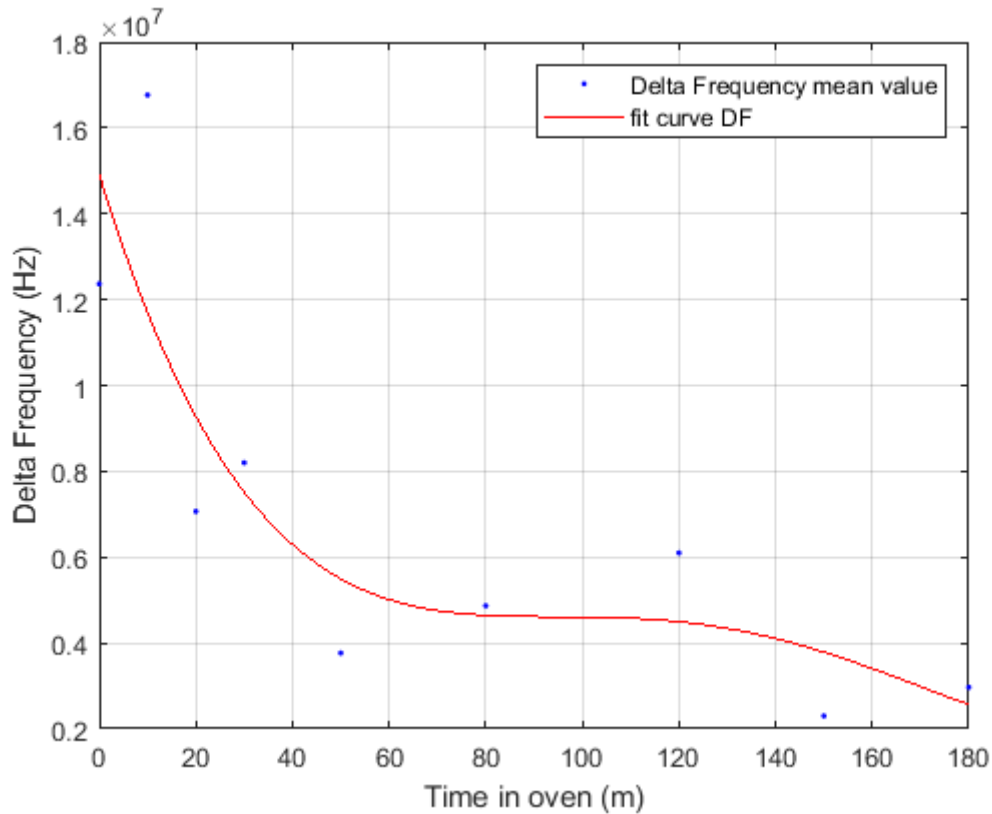
Εικόνα 5.10 -  $\Delta F$  σε σχέση με χρόνο ψησίματος



Επομένως, είναι δυνατό να υπολογισθεί και σε αυτή την περίπτωση μία προσεγγιστική πολυωνμική έκφραση. Η έκφραση αυτή είναι:

$$f(x) = 0.04904 * x^4 - 25.98 * x^3 + 4745 * x^2 - 3.668 * 10^5 * x + 1.492 * 10^7$$

Ομοίως η έκφραση αυτή βασίστηκε στη μέση τιμή ανά κατηγορία. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται τόσο η έκφραση όσο και οι μέσες τιμές.

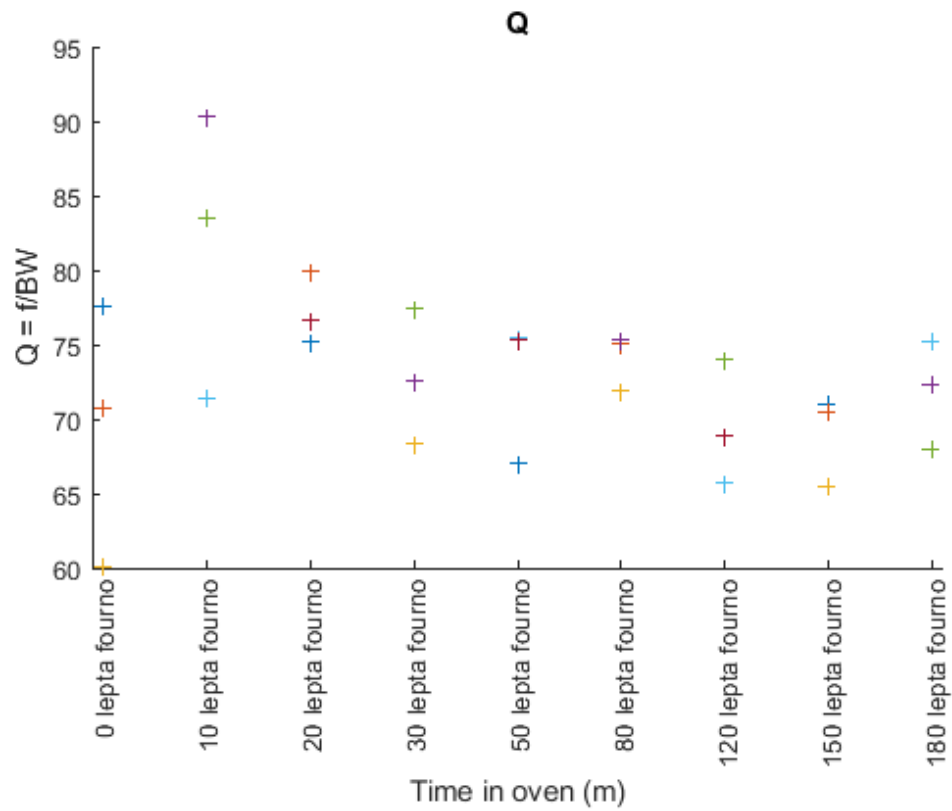


Εικόνα 5.11 - Polynomial Fit Curve 4ου βαθμού Μέσης ΔF ανά κατηγορία σε σχέση με το χρόνο ψησίματος

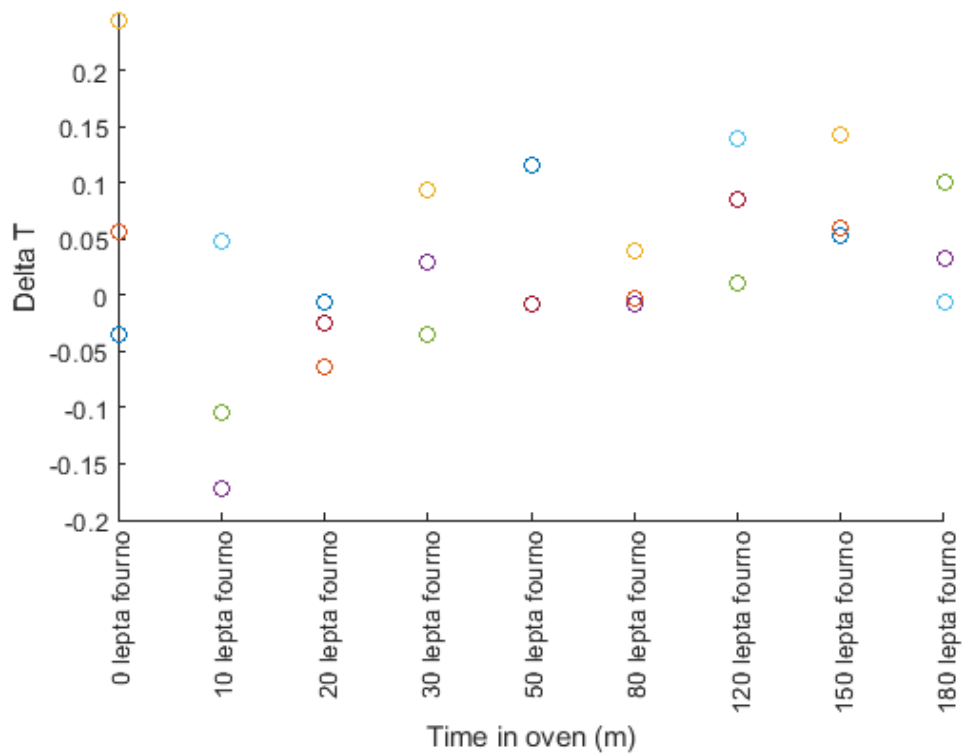
Στη συνέχεια προκειμένου να έχουμε μία ιδέα της ενέργειας που καταναλώνεται στο αντηχείο χρησιμοποιούμε τη μετρική  $\Delta T = \frac{Q_0}{Q_s} - 1$ , όπου  $Q_0$  η συχνότητα του αντηχείου.

Παρακάτω φαίνονται τα  $Q_s$  ανά κατηγορία. Αυτό που παρατηρείται είναι μία πτωτική τάση.

Ακόμη, παρουσιάζεται και το  $\Delta T$  ανά κατηγορία το οποίο έχει μία αυξητική τάση.



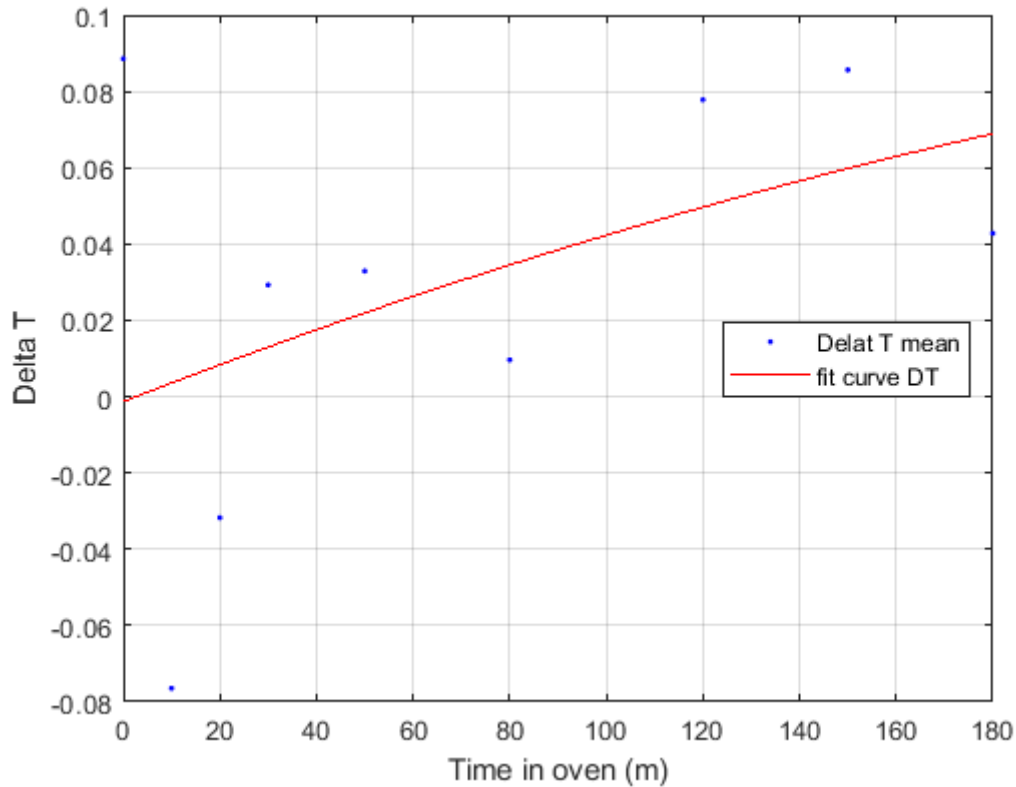
Εικόνα 5.12 - Συντελεστής ποιότητας προς χρόνο ψησίματος



Εικόνα 5.13 -  $\Delta T$  προς χρόνο ψησίματος

Αυτό που παρατηρείται αναφορικά με το  $\Delta T$  είναι ότι και αυτό μπορεί να προσεγγιστεί από μία πολυωνμική εξίσωση. Επομένως, με βάση τις μέσες τιμές ανα κατηγορία κατασκευάζεται το πολυώνυμο:

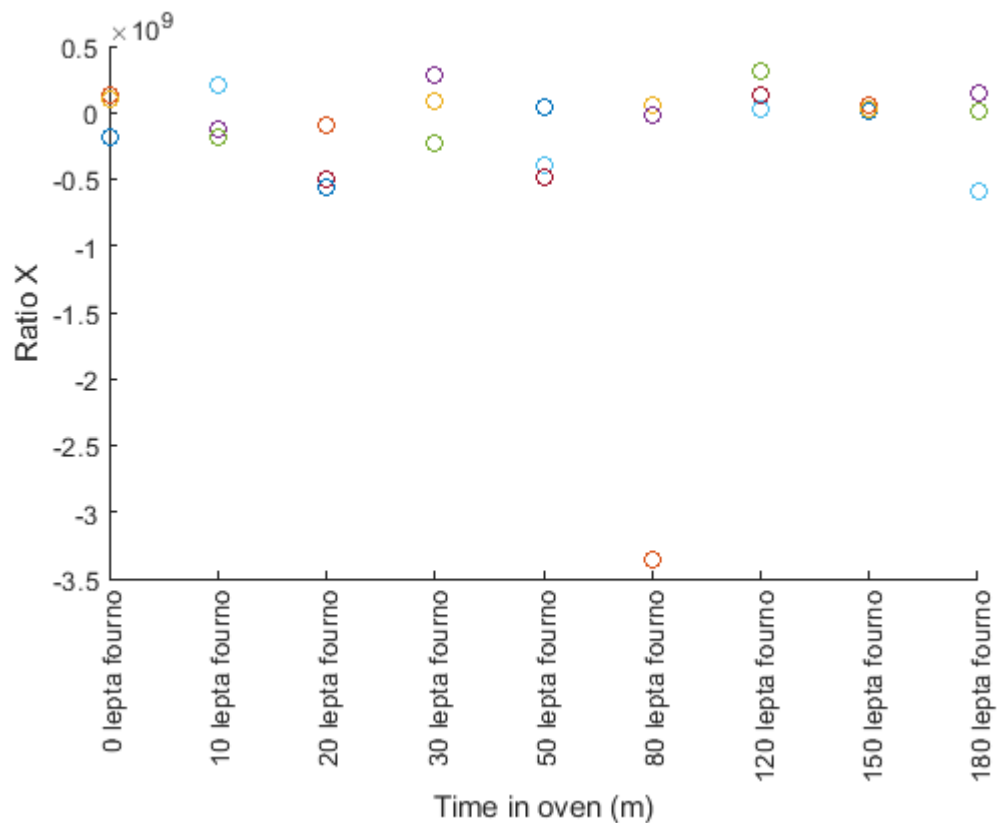
$$-5.777 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 + 0.000494 \cdot x - 0.001305$$



Εικόνα 5.14 - Polynomial Fit Curve  $\Delta T$  2ου βαθμού σε σχέση με το χρόνο ψησίματος

Τόσο το  $\Delta F$  όσο και το  $\Delta T$  γνωρίζουμε από τη θεωρία ότι εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του καρπού όπως η μάζα και ο όγκος του και δεν μπορούν να δώσουν τόσο ξεκάθαρα αποτελέσματα. Μία ανεξάρτητη μετρική είναι ο λόγος τους  $X$ . Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανα κατηγορία για την μετρική αυτή.

Στη νέα μετρική δεν είναι εμφανής κάποια τάση στα δεδομένα. Επομένως, δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα ή κάποια συνάρτηση προσέγγισης.

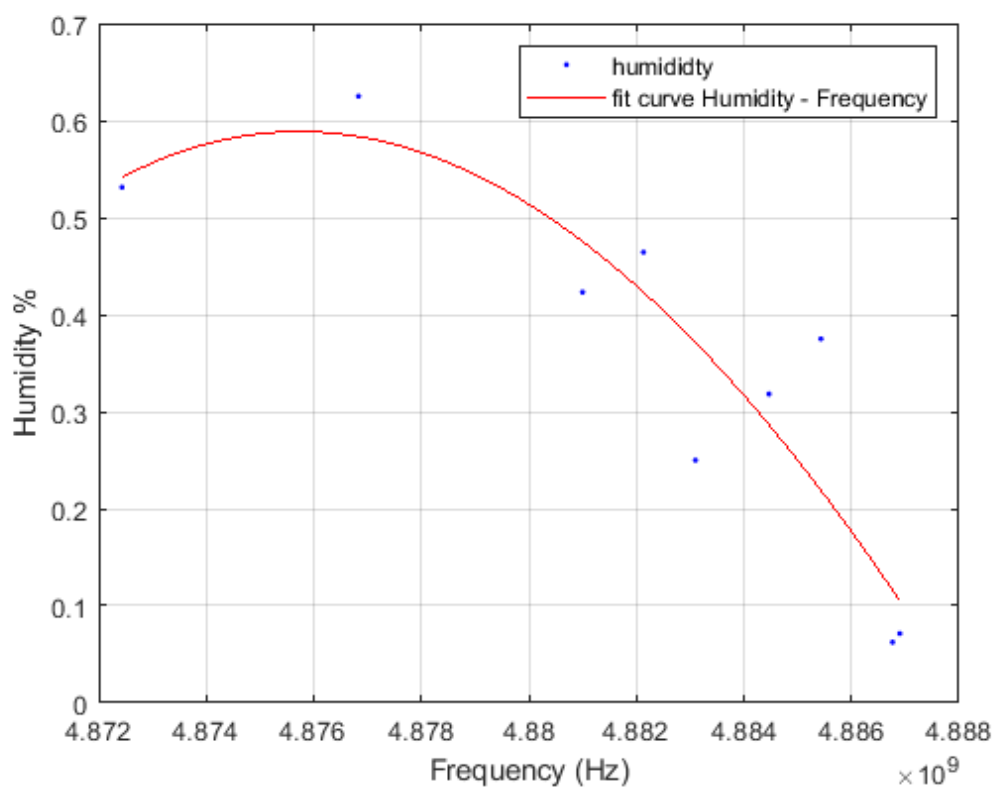


Εικόνα 5.15 - Λόγος  $X$  προς χρόνο ψησίματος

Τελικά, τα αποτελέσματα που μοιάζουν πιο ελπιδοφόρα για μία φανερή συσχέτιση είναι αυτά της απόλυτης συχνότητας. Επιλέγεται, λοιπόν, να συσχετιστεί η σχετική υγρασία των καρπών με την απόλυτη συχνότητα. Το διάγραμμα που προκύπτει φαίνεται παρακάτω και απεικονίζει τη μέση τιμή υγρασίας ανά κατηγορία όπως αυτή υπολογίστηκε από τις μετρήσεις αλλά και μία πολυωνμική καμπύλη που κάνει fit τα δεδομένα. Η καμπύλη είναι η εξής:

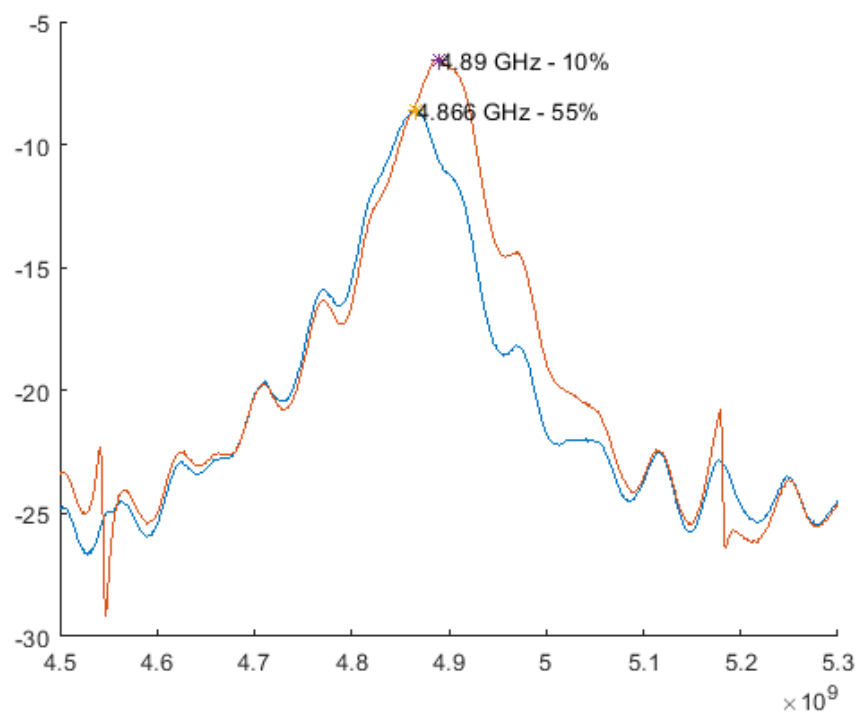
$$f(x) = 3.37 * 10^{-23} * x^3 - 4.971 * 10^{-13} * x^2 + 0.002445 * x - 4.00710^6$$

**Από το διάγραμμα φαίνεται ότι ένας καρπός με συχνότητα συντονισμού 4.872 GHz έχει πάνω από 50% υγρασία ενώ ένας καρπός με συχνότητα περίπου 4.88 GHz υγρασία έχει λιγότερο από 10%.**



Εικόνα 5.16 - Polynomial Curve Fit και μέση τιμή δειγμάτων ανά κατηγορία σε σχέση με την υγρασία

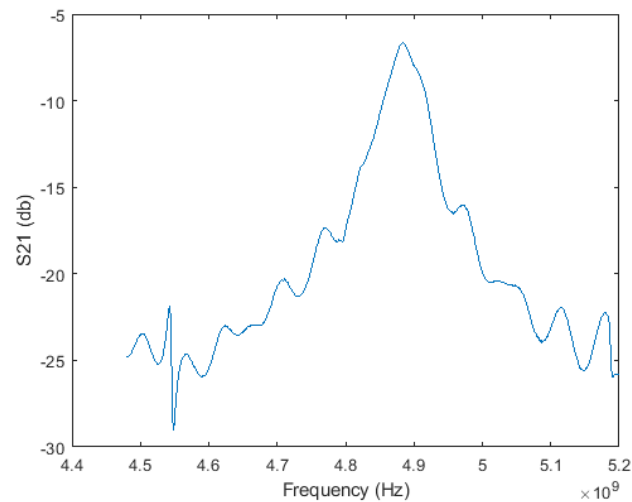
Ενδεικτικά φαίνεται μία σύγκριση μεταξύ της συχνότητας ενός φιστικιού με περίπου 10% υγρασία και ενός με περίπου 50% υγρασία.



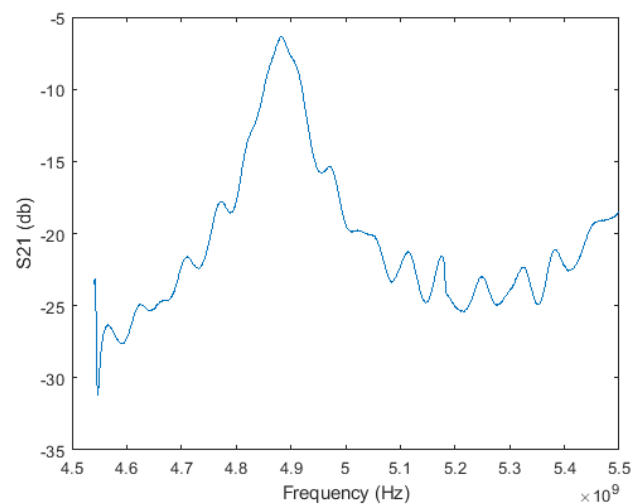
Εικόνα 5.17 - Σύγκριση μεταξύ στεγνού και υγρού φιστικιού

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα μπορεί να γίνει μία σχετική εκτίμηση για την υγρασία που έχουν τα ωμά φιστίκια πριν ακόμη υγραθούν και ψηθούν. Οι συχνότητες συντονισμού που προέκυψαν για τρεις διαφορετικές μετρήσεις ήταν 4.8814 GHz, 4.8841 GHz και 4.8843 GHz. Ο Μέσος όρος των τιμών αυτών είναι **4.8833 GHz**. Επομένως μπορεί να υποθέσει κανείς ότι ο εργοστασιακό έχει **περίπου 30%** υγρασία.

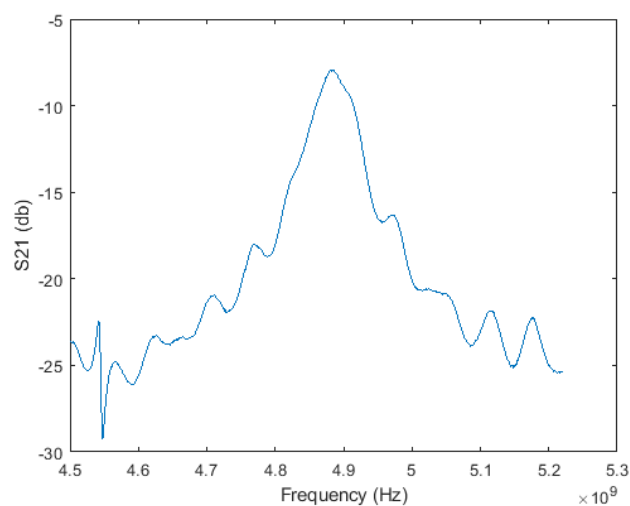
Τα αντίστοιχα διαγράμματα S21 φαίνονται παρακάτω.



Εικόνα 5.18 - Ωμό φιστίκι 1

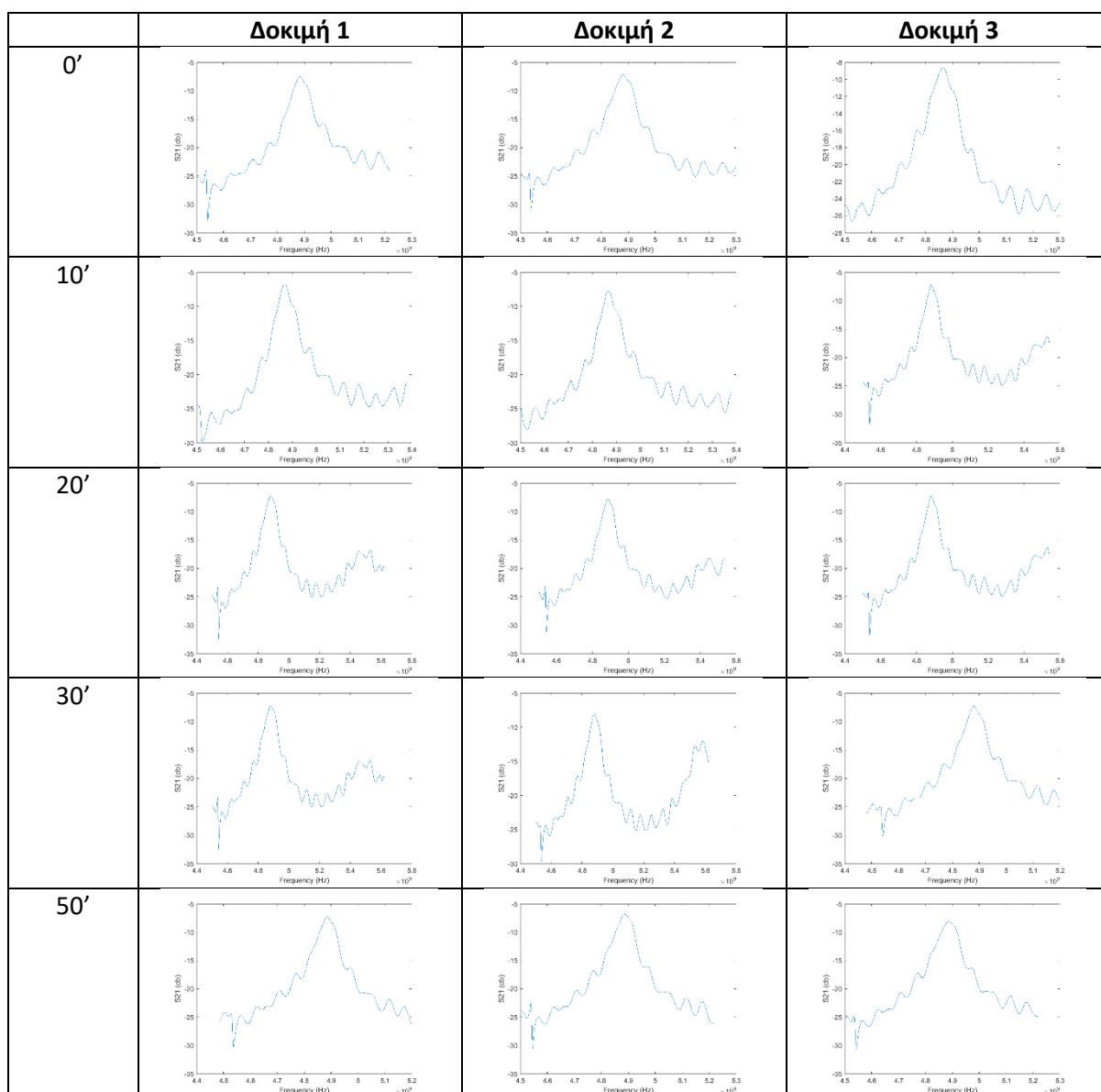


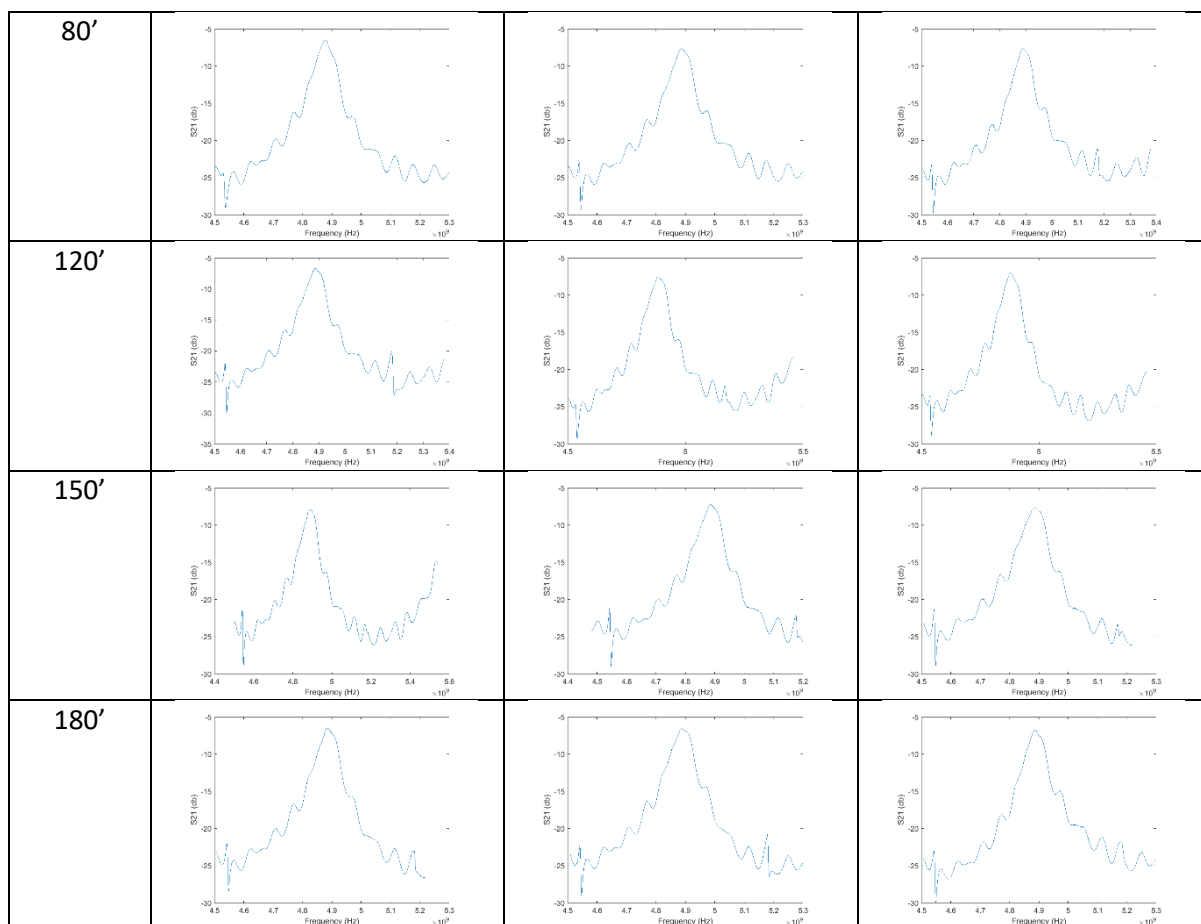
Εικόνα 5.19 - Ωμό φιστίκι 2



Εικόνα 5.20 - Ωμό φιστίκι 3

Τέλος, παρουσιάζονται όλα τα διαγράμματα μετρήσεων της κορυφής 4.





Τα αναλυτικά στοιχεία των παραπάνω μπορούν να βρεθούν στο Παράρτημα Β.



## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

Στην εργασία αυτή παρουσιάσθηκε η μαθηματική ανάλυση ενός χάλκινου αντηχείου. Ακολούθως, προσομοιώθηκε το αντηχείο και επιβεβαιώθηκε η λειτουργικότητα του. Το αντηχείο κατασκευάσθηκε και μετρήθηκε. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν τα αποτελέσματα της σχεδίασης αλλά και της προσομοίωσης.

Στη συνέχεια, από τα πειράματα επιβεβαιώθηκε ότι η υγρασία που περιέχεται σε έναν καρπό επηρεάζει τη συχνότητα συντονισμού του αντηχείου. Ακόμη, όσο πιο υγρός ένας καρπός τόσο χαμηλότερη η συχνότητα συντονισμού. Το γεγονός αυτό ήταν το αναμενόμενο, αφού αντίστοιχη συμπεριφορά είχε παρατηρηθεί και στις προσομοιώσεις.

Τελικά, με την παραδοχή ότι όλοι οι καρποί είχαν περίπου ίδιο μέγεθος παρουσιάσθηκε μία πολυωνμική παράσταση η οποία είναι ικανή να υπολογίσει το ποσοστό υγρασίας που περιέχεται μέσα σε έναν καρπό δεδομένης της συχνότητας συντονισμού που παρουσιάζει το αντηχείο με τον καρπό αυτό.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα σετ δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την εργασία αυτή.

## 7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Παρακάτω παρουσιάζονται τα δεδομένα για κάθε δοκιμή και κάθε συντονισμό.

### 0 ΛΕΠΤΑ ΨΗΣΙΜΟ.

Δοκιμή	Συντονισμός 1	Συντονισμός 2	Συντονισμός 3	Συντονισμός 4
1	3.6760 GHz -24.511720 db	3.8080 GHz -10.116700 db	4.0588 GHz -10.153320 db	4.8816 GHz -7.560303 db
2	3.5000 GHz -22.016600 db	3.8762 GHz -15.410640 db	4.1006 GHz -11.283200 db	4.8816 GHz -7.233643 db
3	3.6794 GHz -23.977540 db	3.7967 GHz -12.176760 db	4.1003 GHz -14.955570 db	4.8662 GHz -8.666016 db

### 10 ΛΕΠΤΑ ΨΗΣΙΜΟ.

Δοκιμή	Συντονισμός 1	Συντονισμός 2	Συντονισμός 3	Συντονισμός 4
1	3.6794 GHz -25.102540 db	3.8082 GHz -9.603516 db	4.0106 GHz -12.082520 db	4.8708 GHz -6.625977 db
2	3.5936 GHz -28.616210 db	3.8192 GHz -10.923340 db	4.1528 GHz -13.226560 db	4.8704 GHz -9.384277 db
3	3.6776 GHz -24.198240 db	3.8000 GHz -8.516113 db	4.0568 GHz -12.164060 db	4.8752 GHz -7.509277 db

### 20 ΛΕΠΤΑ ΨΗΣΙΜΟ.

Δοκιμή	Συντονισμός 1	Συντονισμός 2	Συντονισμός 3	Συντονισμός 4
1	3.6775 GHz -24.672850 db	3.8025 GHz -9.261719 db	4.0625 GHz -11.993160 db	4.8775 GHz -7.080078 db
2	3.5000 GHz -18.419920 db	3.8100 GHz -8.575195 db	4.1075 GHz -9.522461 db	4.8850 GHz -7.820801 db
3	3.6794 GHz -22.365230 db	3.8094 GHz -11.647950 db	4.0616 GHz -10.203610 db	4.8806 GHz -7.251465 db

### 30 ΛΕΠΤΑ ΨΗΣΙΜΟ.

Δοκιμή	Συντονισμός 1	Συντονισμός 2	Συντονισμός 3	Συντονισμός 4
1	3.6742 GHz -24.082030 db	3.8068 GHz -8.948242 db	4.0746 GHz -9.901855 db	4.8832 GHz -7.270996 db
2	3.5000 GHz -17.752930 db	3.7997 GHz -10.527830 db	4.0994 GHz -11.366210 db	4.8824 GHz -7.886475 db
3	3.6782 GHz -23.666990 db	3.8051 GHz -7.662109 db	4.0751 GHz -9.541016 db	4.8797 GHz -7.292725 db

### 50 ΛΕΠΤΑ ΨΗΣΙΜΟ.

Δοκιμή	Συντονισμός 1	Συντονισμός 2	Συντονισμός 3	Συντονισμός 4
<b>1</b>	3.5000 GHz -13.949710 db	3.8108 GHz -12.522460 db	4.1090 GHz -8.968262 db	4.8839 GHz -7.261475 db
<b>2</b>	3.5000 GHz -13.990230 db	3.7940 GHz -12.104490 db	4.0985 GHz -9.076660 db	4.8881 GHz -6.766602 db
<b>3</b>	3.6760 GHz -24.404300 db	3.8058 GHz -8.824219 db	4.0808 GHz -11.462400 db	4.8860 GHz -8.297852 db

### 80 ΛΕΠΤΑ ΨΗΣΙΜΟ.

Δοκιμή	Συντονισμός 1	Συντονισμός 2	Συντονισμός 3	Συντονισμός 4
<b>1</b>	3.6760 GHz -23.931640 db	3.8080 GHz -7.500000 db	4.0940 GHz -10.092290 db	4.8816 GHz -6.774658 db
<b>2</b>	3.5253 GHz -13.919920 db	3.8082 GHz -7.971680 db	4.1394 GHz -9.403809 db	4.8869 GHz -7.524902 db
<b>3</b>	3.5184 GHz -15.274900 db	3.8082 GHz -7.723389 db	4.1440 GHz -9.948730 db	4.8915 GHz -7.638916 db

### 120 ΛΕΠΤΑ ΨΗΣΙΜΟ.

Δοκιμή	Συντονισμός 1	Συντονισμός 2	Συντονισμός 3	Συντονισμός 4
<b>1</b>	3.5192 GHz -15.057130 db	3.8048 GHz -6.812500 db	4.1408 GHz -10.409670 db	4.8872 GHz -6.667969 db
<b>2</b>	3.5000 GHz -19.951170 db	3.8072 GHz -7.517822 db	4.1072 GHz -10.312010 db	4.8848 GHz -7.532715 db
<b>3</b>	3.5375 GHz -10.141600 db	3.8025 GHz -10.259770 db	4.1550 GHz -7.210693 db	4.8800 GHz -6.981934 db

### 150 ΛΕΠΤΑ ΨΗΣΙΜΟ.

Δοκιμή	Συντονισμός 1	Συντονισμός 2	Συντονισμός 3	Συντονισμός 4
<b>1</b>	3.5525 GHz -9.616699 db	3.7975 GHz -13.740720 db	4.1825 GHz -8.959473 db	4.8900 GHz -7.950439 db
<b>2</b>	3.5504 GHz -9.298828 db	3.8276 GHz -11.212890 db	4.1741 GHz -8.182129 db	4.8839 GHz -7.264893 db
<b>3</b>	3.5462 GHz -9.836426 db	3.8003 GHz -12.473140 db	4.1720 GHz -9.079590 db	4.8839 GHz -7.570313 db

### 180 ΛΕΠΤΑ ΨΗΣΙΜΟ.

Δοκιμή	Συντονισμός 1	Συντονισμός 2	Συντονισμός 3	Συντονισμός 4
<b>1</b>	3.5374 GHz -8.503418 db	3.8168 GHz -8.604492 db	4.1556 GHz -6.733154 db	4.8882 GHz -6.075928 db
<b>2</b>	3.5418 GHz -9.387695 db	3.8124 GHz -7.829346 db	4.1556 GHz -7.158936 db	4.8904 GHz -6.614502 db
<b>3</b>	3.5483 GHz	3.8013 GHz	4.1670 GHz	4.8869 GHz

	-8.900879 db	-11.683590 db	-8.157715 db	-6.648926 db
--	--------------	---------------	--------------	--------------

## 8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Λεπτά	Δοκιμή 1	Δοκιμή 2	Δοκιμή 3
0'	4.8825 GHz -7.459717 db	4.8820 GHz -7.154053 db	4.8660 GHz -8.580078 db
10'	4.8685 GHz -6.659180 db	4.8696 GHz -7.758057 db	4.8792 GHz -7.413818 db
20'	4.8768 GHz -7.349365 db	4.8861 GHz -7.758057 db	4.8835 GHz -7.244629 db
30'	4.8808 GHz -7.219971 db	4.8808 GHz -7.905762 db	4.8814 GHz -7.224609 db
50'	4.8859 GHz -7.259033 db	4.8852 GHz -6.703857 db	4.8852 GHz -8.034668 db
80'	4.8770 GHz -6.455811 db	4.8870 GHz -7.625488 db	4.8894 GHz -7.617676 db
120'	4.8861 GHz -6.688477 db	4.8852 GHz -7.536865 db	4.8780 GHz -7.023193 db
150'	4.8887 GHz -7.878662 db	4.8859 GHz -7.245117 db	4.8861 GHz -7.652588 db
180'	4.8843 GHz -6.517822 db	4.8900 GHz -6.566162 db	4.8860 GHz -6.752441 db