



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ**  
**ΣΠΟΥΔΩΝ «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»**

Μεταπτυχιακή Εργασία

**«Χαρακτηρισμός δοκιμίων**  
**χάλυβα με χρήση μαγνητικού αισθητήρα»**

Παπαγγελής Δημήτριος

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Αθήνα, 2022





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ  
ΣΠΟΥΔΩΝ «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»**

Μεταπτυχιακή Εργασία

**«Χαρακτηρισμός δοκιμίων  
χάλυβα με χρήση μαγνητικού αισθητήρα»**

Παπαγγελής Δημήτριος

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

.....  
Ευάγγελος Χριστοφόρου  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Σολδάτος Αργύριος  
Ε.ΔΙ.Π.

.....  
Σπυρίδων Αγγελόπουλος  
Διδάκτωρ

Αθήνα, 2022



## Ευχαριστίες

Θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου, για την υπομονή και αμέριστη κατανόηση που έδειξε κατά την εκπόνηση της, χωρίς τις οποίες θα ήταν αδύνατη η ολοκλήρωση της. Θέλω επίσης να ευχαριστήσω τους συναδέλφους στο εργαστήριο αισθητήρων, κ. Σπυρίδωνα Αγγελόπουλο και ιδιαίτερα τον κ. Χρόνη Παττακό για τις συμβουλές τους και την καθοδήγηση τους κατά τη συγγραφή και την πειραματική διαδικασία.

Θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου, που με στήριξαν ψυχολογικά το τελευταίο διάστημα το οποίο δεν θα ήταν το ίδιο χωρίς αυτούς. Τον συνάδελφο και φίλο Φίλιππο Βώκο για τη βοήθεια του σε όλη την διαδρομή μου στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα. Τον αδερφό μου, Διονύση, που άκουγε τα παράπονα μου και με υποστηρίζει όπως μπορούσε.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την κοπέλα μου, Χρυσάνθη, για την απεριόριστη κατανόηση και τις μακριές νύχτες που κοιμήθηκε υπό τον ήχο πλήκτρων και μέσα στην μυρωδιά του καφέ και των υποκατάστατων τσιγάρου.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ είναι προς του γονείς μου, Γιώργο και Μαρία, η υπομονή και ενθάρρυνση των οποίων ήταν πραγματικά απaráμιλλη, ίσως παρά την καλύτερη τους κρίση. Σας ευχαριστώ.



## Περίληψη

Η παρούσα εργασία ασχολείται με τον χαρακτηρισμό της συμπεριφοράς της μαγνητικής διαπερατότητας δοκιμών ηλεκτρικού χάλυβα, χρησιμοποιώντας για να επιτευχθεί αυτό μια διάταξη αισθητήρων και οργάνων που μετρούν την τάση εισόδου και την τάση εξόδου ανάμεσα σε δύο πηνία περιελιγμένα σε ένα πυρήνα (yoke) από ταινίες υαλώδους ηλεκτρικού χάλυβα. Η μεθοδολογία είναι εύκολο να εφαρμοστεί με επιτυχία σε οποιοδήποτε φερρομαγνητικό υλικό.

Η παρούσα έρευνα μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση της συμπεριφοράς της μαγνητικής διαπερατότητας και της μαγνητικής συμπεριφοράς των ηλεκτρικών χαλύβων σε αντιστοιχία με το μέγεθος των κόκκων και τις μηχανικές παραμορφώσεις που έχουν υποστεί. Επίσης, η συσχέτιση ανάμεσα στην μαγνητική διαπερατότητα και σε πρότυπα δοκίμια χάλυβα έχει αξία σαν αναφορά κατά την εφαρμογή μη καταστροφικών ελέγχων σε συνθήκες εκτός εργαστηρίου.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναπτύσσονται θέματα θεωρίας γύρω από τα φαινόμενα που συναντώνται κατά την πειραματική διαδικασία. Γενικές αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού, πιο εξειδικευμένες ιδιότητες των φερρομαγνητικών υλικών, ορισμένα θέματα αισθητήρων και ιδιότητες των υλικών που συμμετέχουν στην πειραματική διαδικασία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική διάταξη και η διαδικασία του πειράματος, ακολουθούμενες από την διαγραμματική παρουσίαση των μετρήσεων και της ανάλυσης των αποτελεσμάτων.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύσσονται τα συμπεράσματα της έρευνας και εξάγονται πληροφορίες, ενώ προτείνεται μια μελλοντική κατεύθυνση του παρόντος πειράματος.

Λέξεις κλειδί: ηλεκτρικός χάλυβας, αισθητήρας μαγνητικής διαπερατότητας, χαρακτηρισμός χάλυβα, μη καταστροφικός έλεγχος





## Abstract

The following study deals with the behavior of the magnetic permeability of sample of electrical steel. To achieve this, an array of sensors and instruments were used in order to measure the input and output voltage of two coils in wound around a yoke of amorphous electrical steel strips. This methodology is easily applied to any ferromagnetic material.

The present research can help in the understanding of the behavior of magnetic permeability and magnetic behavior of electrical steels in correspondence with the grain size and the mechanical deformations they have undergone. Also, the correlation between magnetic permeability and standard steel samples is valuable as a reference when applying non-destructive testing in non-laboratory conditions.

In the first chapter, theoretical background is developed around the phenomena encountered during the experimental process. General principles of electromagnetism, more specialized properties of ferromagnetic materials, some theoretical background on sensors and properties of the materials involved in the experimental process.

In the second chapter, the experimental setup and procedure of the experiment are described, followed by the diagrammatic presentation of the measurements and the analysis of the results.

In the third chapter, the conclusions of the research are developed and information is extracted from the data, while a future direction of the present experiment is proposed.

Key words: electrical steel, magnetic permeability sensor, steel characterization, non-destructive testing



## Περιεχόμενα

|   |     |
|---|-----|
| Ευχαριστίες .....   | v   |
| Περίληψη .....  | i   |
| Abstract.....   | iii |
| 1. Θεωρητικό υπόβαθρο .....                                       | 1   |
| 1.1. Μαγνητισμός.....   | 1   |
| 1.1.1. Βασικές έννοιες .....                                      | 1   |
| 1.1.2. Νόμοι του ηλεκτρομαγνητισμού και ιδιότητες.....            | 2   |
| 1.1.3. Οι εξισώσεις του Μάξγουελ (Maxwell's equations) .....      | 4   |
| 1.2. Μαγνητικά Υλικά .....  | 5   |
| 1.2.1. Μαγνητικά υλικά ανά κατηγορία.....                         | 5   |
| 1.2.2. Φερρομαγνητικά Υλικά .....                                 | 6   |
| 1.2.3. Βρόχος Υστέρησης .....                                     | 9   |
| 1.2.3.1. Ανάλυση του Βρόχου Υστέρησης .....                       | 10  |
| 1.2.3.2. Μαγνητική Διαπερατότητα.....                             | 12  |
| 1.3. Δινορεύματα .....  | 14  |
| 1.4. Επιδερμικό φαινόμενο.....                                    | 15  |
| 1.5. Μαγνητικά Κυκλώματα .....                                    | 17  |
| 1.5.1. Διϋσμός των μαγνητικών κυκλωμάτων .....                    | 18  |
| 1.5.2. Κανόνες και Νόμοι που Διέπουν τα Μαγνητικά Κυκλώματα ..... | 21  |
| 1.5.3. Μαγνητοεγερτική Δύναμη .....                               | 22  |
| 1.5.4. Μαγνητικές Αντιστάσεις.....                                | 23  |
| 1.6. Έλεγχος Υγείας Υλικών .....                                  | 23  |
| 1.7. Μαγνητικοί αισθητήρες.....                                   | 26  |
| 1.7.1. Αισθητήρες Μαγνητικής Ροής.....                            | 26  |
| 1.7.2. Αισθητήρες Μαγνητικής Διαπερατότητας .....                 | 27  |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1.8.   | Ηλεκτρικός Χάλυβας .....                                   | 28 |
| 1.9.   | Metglas.....   | 29 |
| 2.     | Πειραματικό Μέλος.....                                     | 31 |
| 2.1.   | Περιγραφή της Διάταξης.....                                | 31 |
| 2.2.   | Εργαστηριακός Εξοπλισμός .....                             | 32 |
| 2.3.   | Δοκίμια που Χρησιμοποιήθηκαν .....                         | 33 |
| 2.4.   | Πειραματική Διαδικασία.....                                | 35 |
| 2.5.   | Παρουσίαση μετρήσεων.....                                  | 36 |
| 2.5.1. | Διαγράμματα Τάσης Εισόδου – Τάσης Εξόδου ανά Δοκίμιο ..... | 36 |
| 2.6.   | Επεξεργασία Δεδομένων Μετρήσεων .....                      | 59 |
| 3.     | Συμπεράσματα .....   | 76 |
|        | Βιβλιογραφία .....   | 78 |
| ❖      | Παράρτημα .....  | 81 |
| ▪      | Πίνακες μετρήσεων δοκιμών ανά συχνότητα .....              | 81 |
| •      | f = 0.2Hz .....  | 84 |
| •      | f = 0.5Hz .....  | 87 |
| •      | f = 1Hz .....  | 90 |
| •      | f = 2Hz .....  | 93 |





# 1. Θεωρητικό υπόβαθρο

## 1.1. Μαγνητισμός

Από την αρχαιότητα η ανθρωπότητα γνωρίζει την ύπαρξη του μαγνητισμού. Από την αρχαία Ελλάδα μέχρι την αρχαία Κίνα οι ιδιότητες των μαγνητών καταγράφονται. Η πρώτη αξιοποίηση των μαγνητικών ιδιοτήτων έγινε τον 11 αιώνα π.Χ. από τους Κινέζους στην ναυσιπλοΐα με τη δημιουργία των πυξίδων. Από τότε και μέχρι τον 19<sup>ο</sup> αιώνα επιστήμονες ασχολήθηκαν με την διερεύνηση των μαγνητικών ιδιοτήτων. Τον 19<sup>ο</sup> αιώνα, τρεις περίφημοι πλέον επιστήμονες, ο Φαραντέι, ο Αμπέρ και ο Γκάους, περιέγραψαν με τη θεωρία και τις εξισώσεις που προσέφεραν στην ανθρωπότητα τον μαγνητισμό και τη σχέση του με τον ηλεκτρισμό. Τις θεωρίες τους και την έρευνα τους την ενοποίησε ο Τζέιμς Κλέρκ Μάξγουελ παράγοντας τις τέσσερις «εξισώσεις του Μάξγουελ» οι οποίες περιγράφουν τον κόσμο του ηλεκτρομαγνητισμού. Οι εξισώσεις αυτές περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν τα μαγνητικά και τα ηλεκτρικά πεδία, το πώς αλληλοεπιδρούν και το πώς επηρεάζονται από αντικείμενα.

### 1.1.1. Βασικές έννοιες

**Μαγνητικό πεδίο:** Ο χώρος μέσα στον οποίο όταν βρίσκεται μια μαγνητική ποσότητα, στην ποσότητα αυτή ασκείται μια δύναμη. Είναι γνωστό ότι οι μαγνητικές ποσότητες αυτές είναι φορτία ηλεκτρικής φύσεως και κινούνται εντός των αγωγών με μορφή ηλεκτρικού ρεύματος. Η πυκνότητα της μαγνητικής ροής ενός πεδίου (μαγνητική επαγωγή) συμβολίζεται με  $\mathbf{B}$  και είναι διάνυσμα το οποίο σχετίζεται με όλα τα σημεία του χώρου. Στην περίπτωση ενός φορτίου, έστω  $q$ , κινούμενου με ταχύτητα  $\mathbf{u}$  μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο  $\mathbf{B}$ , στο φορτίο αυτό θα ασκηθεί μια μαγνητική δύναμη  $\mathbf{F}$  ίση με:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{u} \times \vec{B} \quad (1.1)$$

και μέτρο ίσο με:

$$|\vec{F}| = quB \sin(\theta) \quad (1.2)$$

Όπου  $\theta$  η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στα διανύσματα  $\mathbf{u}$  και  $\mathbf{B}$ .

Έστω ένας αγωγός ρεύματος που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης  $I$  και περιβάλλεται από μαγνητικό πεδίο έντασης  $\mathbf{H}$ . Σύμφωνα με το νόμο του Ampere ισχύει:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I \quad (1.3)$$

Για την απεικόνιση ενός τέτοιου πεδίου χρησιμοποιείται διάγραμμα μαγνητικών δυναμικών γραμμών. Η πυκνότητα αυτών των γραμμών δείχνει την ένταση του μαγνητικού πεδίου σε μια ορισμένη περιοχή. Για ομογενές πεδίο οι γραμμές εμφανίζονται παράλληλες και απέχουν σταθερή απόσταση μεταξύ τους.

Ο αριθμός των μαγνητικών γραμμών που διέρχονται από μια ορισμένη επιφάνεια εμβαδού  $S$  σε ένα μαγνητικό πεδίο  $\mathbf{B}$  ονομάζεται μαγνητική ροή και συμβολίζεται με  $\Phi$ .

$$\Phi = B \cdot S \quad (1.4)$$

### 1.1.2. Νόμοι του ηλεκτρομαγνητισμού και ιδιότητες

- Νόμος του Ampere

Για πλήθος  $n$  αγωγών ρεύματος που διαρρέονται από ρεύμα ισχύος  $I$ , η παρακάτω σχέση δείχνει την ισχύ του μαγνητικού πεδίου  $\mathbf{H}$  που δημιουργείται.



$$nI = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (1.5)$$

όπου  $d\vec{l}$  είναι το μοναδιαίο διάνυσμα.

- Μαγνητική διαπερατότητα

Οποιοδήποτε σώμα εντός ενός μαγνητικού πεδίου με ένταση  $\mathbf{H}$  δημιουργεί μια επαγωγή  $\mathbf{B}$ . Η επαγωγή συνδέεται με την ένταση του πεδίου μέσω ενός μεγέθους που είναι χαρακτηριστικό μέγεθος κάθε σώματος και ονομάζεται μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$ . Ο υπολογισμός αυτού του μεγέθους αποτελεί και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Για το κενό είναι γνωστή η μαγνητική διαπερατότητα  $\mu_0$ , η οποία ορίζεται ως παγκόσμια σταθερά. Για το κενό ισχύει η παρακάτω σχέση.

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} \quad (1.6)$$

όπου  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H / m}$

Για υλικά εφαρμόζεται και ισχύει η παρακάτω σχέση.

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (1.7)$$

Όπου  $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$

Το  $\mu_r$  στην παραπάνω σχέση ονομάζεται σχετική μαγνητική διαπερατότητα και είναι καθαρός αριθμός.

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις, εξάγεται ότι

$$\vec{B} = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \vec{H} \quad (1.8)$$

Νόμος Biot-Savart.

Για να βοηθηθεί ο υπολογισμός της έντασης μαγνητικού πεδίου στην περίπτωση που η πηγή της προέλευσής του είναι αγωγός που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο νόμος Biot-Savart. Σύμφωνα με αυτόν, θεωρείται ένα

στοιχειώδες μήκος  $\delta l$  του αγωγού που διαρρέεται από ρεύμα  $I$  το οποίο παράγει μαγνητικό πεδίο έντασης  $\delta H$  σε απόσταση  $r$ . Η ολική ένταση του μαγνητικού πεδίου υπολογίζεται ολοκληρώνοντας την παρακάτω σχέση.

$$\delta \vec{H} = \frac{1}{4\pi r^2} \cdot i \cdot \delta \vec{l} \times \vec{u} \quad (1.9)$$

### 1.1.3. Οι εξισώσεις του Μάξγουελ (Maxwell's equations)

- 1<sup>η</sup> εξίσωση του Μάξγουελ – ο νόμος του Γκάους.

Ο νόμος του Γκάους επεξηγεί τη συμπεριφορά ενός ηλεκτρικού πεδίου. Σύμφωνα με αυτόν, σε μια ορισμένη κλειστή επιφάνεια (π.χ. επιφάνεια σφαίρας) το ολοκλήρωμα του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  είναι ανάλογο με το συνολικό φορτίο που περικλείεται εντός αυτής.

$$\oiint_{d\Omega} E \cdot dS = 4\pi \iiint_{\Omega} \rho \cdot dV \quad (1.10)$$

- 2<sup>η</sup> εξίσωση του Μάξγουελ – ο νόμος του Γκάους για τον μαγνητισμό.

Ένα μαγνητικό πεδίο  $B$  που περνά από ένα επιφανειακό ολοκλήρωμα είναι μηδέν. Αυτό που αναδεικνύει αυτός ο νόμος είναι ότι δεν υπάρχουν μαγνητικά μονόπολα, καθώς κάθε γνωστός μαγνήτης αποτελείται από δύο πόλους, θετικό και αρνητικό, και δε δύναται να δράσει ως πηγή μαγνητικού πεδίου.

$$\oiint_{d\Omega} E \cdot dS = 0 \quad (1.11)$$

- 3<sup>η</sup> εξίσωση του Μάξγουελ – η εξίσωση Μάξγουελ – Φαραντέι.

Η εξίσωση των Μάξγουελ και Φαραντέι εκφράζει τον τρόπο με τον οποίο ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει ένα ηλεκτρικό πεδίο.

$$\oint_{d\Sigma} E \cdot dl = -\frac{d}{dt} \iint_{\Sigma} B \cdot dS \quad (1.12)$$

- 4<sup>η</sup> εξίσωση του Μάξγουελ – ο νόμος του Αμπέρ κατά Μάξγουελ.

Η τελευταία εξίσωση του Μάξγουελ μας δείχνει ότι τόσο το ρεύμα αγωγιμότητας όσο και το ρεύμα μετατόπισης μπορούν να δράσουν ως πηγές μαγνητικού πεδίου.

$$\oint_{d\Sigma} B \cdot dl = \frac{1}{c} \left( 4\pi \iint_{\Sigma} J \cdot dS + \frac{d}{dt} \iint_{\Sigma} E \cdot dS \right) \quad (1.13)$$

Στις σχέσεις που αναλύθηκαν τα μεγέθη είναι αναλυτικά:

- B : μαγνητική επαγωγή
- E : ένταση ηλεκτρικού πεδίου
- J : πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος
- $\epsilon_0$  : η διηλεκτρική σταθερά του κενού
- $\mu_0$  : η μαγνητική διαπερατότητα του κενού
- c : η ταχύτητα του φωτός
- $\rho$  : πυκνότητα ηλεκτρικού φορτίου
- S : μια κλειστή επιφάνεια η οποία περικλείει τα φορτία και έχει όγκο V

## 1.2. Μαγνητικά Υλικά

### 1.2.1. Μαγνητικά υλικά ανά κατηγορία

Ένα σώμα οφείλει τις μαγνητικές του ιδιότητες στην περιστροφή ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα των ατόμων του καθώς και στο spin που αυτά τα ηλεκτρόνια έχουν. Όλα τα υλικά μπορούν να καταταχθούν σε κατηγορίες ανάλογα με τη

συμπεριφορά τους στην μαγνήτιση, οι πιο συνηθισμένες από αυτές τις κατηγορίες είναι τα φερρομαγνητικά, τα παραμαγνητικά και τα διαμαγνητικά υλικά.

- Φερρομαγνητικά ονομάζονται τα υλικά που εμφανίζουν έντονη μαγνητική συμπεριφορά. [1]
- Παραμαγνητικά ονομάζονται τα υλικά που εμφανίζουν έλξη ανεξαρτήτως της πολικότητας του μαγνήτη στο πεδίου του οποίου βρίσκονται. Η έλξη αυτή σε σύγκριση με τα φερρομαγνητικά υλικά έχει σημαντικά μικρότερο μέτρο σε σημείο να είναι δύσκολο να παρατηρηθεί. [2]
- Διαμαγνητικά ονομάζονται τα υλικά τα οποία εμφανίζουν, σε αντίστροφη αντιστοιχία με τα παραμαγνητικά, άπωση ανεξαρτήτως της πολικότητας του μαγνήτη στο πεδίου του οποίου βρίσκονται. Παρομοίως, η άπωση που εμφανίζουν είναι και σε αυτή την περίπτωση πολύ μικρή. [3]

### 1.2.2. Φερρομαγνητικά Υλικά

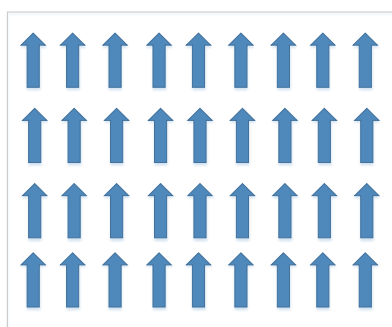
Ως φερρομαγνητικά κατηγοριοποιούνται τα υλικά οι μαγνητικές ιδιότητες των οποίων είναι δυνατό να παρατηρηθούν εκτός εργαστηρίου και χωρίς τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού [4]. Οι μόνιμοι μαγνήτες και τα υλικά που έλκονται από αυτούς είναι το σύνολο των υλικών που απαρτίζουν αυτή την ομάδα. Μόνιμοι μαγνήτες ονομάζονται τα υλικά που όταν βρεθούν μέσα σε ένα εξωγενές μαγνητικό πεδίο, από μια ισχύ του πεδίου και μεγαλύτερη, αποκτούν και αυτά μαγνητικές ιδιότητες τις οποίες διατηρούν και μετά την απομάκρυνση του πεδίου.

Τα πιο γνωστά φερρομαγνητικά υλικά είναι ο σίδηρος (Fe), το νικέλιο (Ni) και το κοβάλτιο (Co). Η εξήγηση των μαγνητικών ιδιοτήτων των φερρομαγνητικών υλικών βρίσκεται στον μικρόκοσμο, παρά το γεγονός ότι το ίδιο το φαινόμενο χαρακτηρίζεται μακροσκοπικό. Όπως είναι γνωστό, τα ηλεκτρόνια αποτελούν το στοιχειώδες αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο. Έχουν όμως ένα ακόμη χαρακτηριστικό που ονομάζεται spin. Ο συνδυασμός των δύο αυτών ιδιοτήτων κάνει τα ηλεκτρόνια να παρουσιάζουν μια διπολική μαγνητική ροπή. Κατά τον τρόπο αυτό, ένα ηλεκτρόνιο συμπεριφέρεται

σαν στοιχειώδης μαγνήτης. Σε συνδυασμό με την περιφορά των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα των ατόμων, η μαγνητική συμπεριφορά αυτή ενισχύεται.

Το spin έχει δύο διαφορετικές κατευθύνσεις. Στα στοιχεία όπου οι εξωτερικές ατομικές στοιβάδες είναι συμπληρωμένες τα ηλεκτρόνια σχηματίζουν ζεύγη. Τα ηλεκτρόνια κάθε ζεύγους έχουν αντίθετο spin και έτσι αλληλοαναιρούνται οι μαγνητικές δυνάμεις του κάθε διακριτού ηλεκτρονίου. Μέσω αυτού του μηχανισμού κάθε άτομο αλλά και κάθε στοιχείο δεν παρουσιάζει μαγνητική διπολική ροπή.

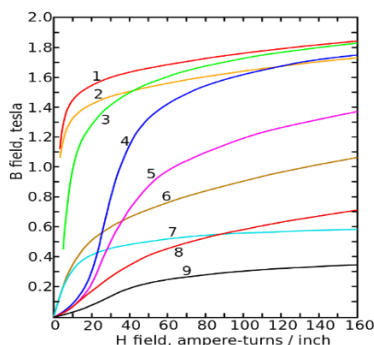
Στην περίπτωση που οι εξωτερικές ατομικές στοιβάδες ενός στοιχείου δεν είναι συμπληρωμένες, το στοιχείο παρουσιάζει μαγνητικές ιδιότητες. Αυτή η συμπεριφορά εμφανίζεται στα φερρομαγνητικά και στα παραμαγνητικά υλικά. Η διαφορά μεταξύ τους είναι ότι στα φερρομαγνητικά υλικά, τα μαγνητικά δίπολα τείνουν να ευθυγραμμίζονται φυσικά μεταξύ τους με αποτέλεσμα να εμφανίζουν σημαντικά πιο έντονες μαγνητικές ιδιότητες από τα παραμαγνητικά υλικά. Η ιδιότητα αυτή των φερρομαγνητικών υλικών εκφράζεται στην περίπτωση που βρίσκονται εντός ενός εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Η μαγνητική επαγωγή  $B$  που αναπτύσσεται εξαρτάται από την ένταση του μαγνητικού πεδίου  $H$  αλλά και από την υπάρχουσα μαγνήτιση  $I$  του υλικού. Καθώς τα μεγέθη  $B$ ,  $H$  και  $I$  είναι διανυσματικά, η κατεύθυνση τους έχει καταλυτικό ρόλο στο τελικό φαινόμενο.



Εικόνα 1 – Μαγνητικές ροπές μέσα σε ένα φερρομαγνητικό υλικό

Η μαγνήτιση  $I$  σε ένα φερρομαγνητικό υλικό έρχεται σε κορεσμό με την ευθυγράμμιση όλων των στοιχειωδών μαγνητικών διπόλων, αυτό σημαίνει ότι η μαγνητική επαγωγή τους αυξάνεται ανάλογα με την ισχύ του μαγνητικού πεδίου μέσα στο οποίο βρίσκονται, μέχρι το σημείο που ολοκληρώνεται η ευθυγράμμιση των

στοιχειωδών μαγνητικών περιοχών τους. Όταν ολοκληρωθεί η ευθυγράμμιση αυτή, η επαγωγή παύει να αυξάνεται και το υλικό έρχεται σε κατάσταση κορεσμού [5]. Τα φερρομαγνητικά υλικά εμφανίζουν κοινά στοιχεία στη συμπεριφορά τους, διαφέρουν όμως μεταξύ τους στην τιμή κορεσμού της μαγνήτισης καθώς και στον ρυθμό με τον οποίο την φτάνουν.



Εικόνα 2 – Καμπύλες μαγνήτισης για 9 φερρομαγνητικά υλικά, με τα σημεία κορεσμού. Αναλυτικά: 1 φύλλα χάλυβα, 2 σιλικόνη, 3 χάλυβας, 4 βολφραμιούχος χάλυβας (tungsten steel), 5 μαγνητικός χάλυβας, 6 χυτοσίδηρος, 7 νικέλιο, 8 κοβάλτιο, 9 μαγνητίτης. [6]

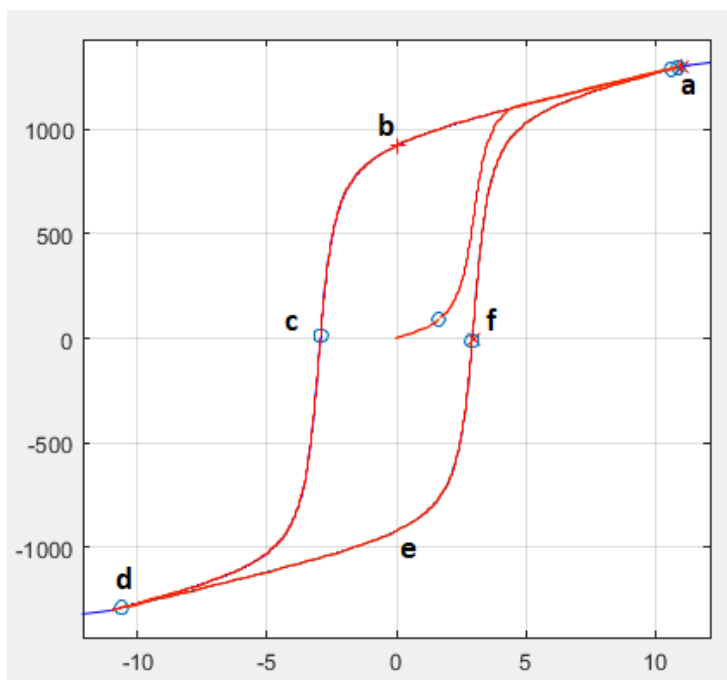
Από την εικόνα 2 παρατηρείται μια ιδιότητα των φερρομαγνητικών υλικών που είναι και αυτή που τα ξεχωρίζει από τις υπόλοιπες κατηγορίες υλικών. Όπως αναφέρεται παραπάνω, η μαγνητική επαγωγή  $\mathbf{B}$  ενός υλικού σε σχέση με την ένταση του μαγνητικού πεδίου  $\mathbf{H}$  που επιδρά πάνω του εκφράζεται μέσω της παρακάτω εξίσωσης.

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (1.7)$$

Σε ένα φερρομαγνητικό όμως υλικό, όπως διαγράφεται και στην εικόνα 2, η σχέση αυτή είναι πιο περίπλοκη, καθώς η μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$  δεν είναι σταθερά αλλά μεταβάλλεται σύμφωνα με την τρέχουσα κατάσταση του υλικού.

### 1.2.3. Βρόχος Υστέρησης

Ο πιο κοινός τρόπος να αναπαρασταθεί το μεγαλύτερο μέρος των μαγνητικών ιδιοτήτων ενός φερρομαγνητικού υλικού είναι να σχηματιστεί μια γραφική παράσταση της μαγνητικής επαγωγής  $B$  σε συνάρτηση με την ισχύ  $H$  ενός εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου για διαφορετικές τιμές του  $H$  [7].



Εικόνα 3 – Παράδειγμα βρόχου υστέρησης.

Η καταλληλότητα ενός φερρομαγνητικού υλικού για χρήσεις μαγνητικής φύσεως καθορίζεται κατά κύριο λόγο από τα χαρακτηριστικά που τους αποδίδονται μέσω της ανάγνωσης του βρόχου υστέρησης. Για παράδειγμα, ένας μετασχηματιστής απαιτεί υλικά με υψηλή μαγνητική διαπερατότητα και μικρές απώλειες λόγω υστέρησης, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες σε ηλεκτρισμό. Ένας μόνιμος μαγνήτης χρειάζεται να έχει υψηλή τιμή παραμένουσας μαγνήτισης και συνεκτικού πεδίου. Αντίθετα, ένας ηλεκτρομαγνήτης πρέπει να έχει χαμηλή τιμή παραμένουσας μαγνήτισης και συνεκτικού πεδίου ώστε να έχει την ανταπόκριση που χρειάζεται ο

χειριστής του, να αυξομειώνεται και να μηδενίζεται η μαγνητική του ιδιότητα κατά εντολή και με ορθή απόκριση.

#### 1.2.3.1. Ανάλυση του Βρόχου Υστέρησης

Η μελέτη του βρόχου υστέρησης αναδεικνύει πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά της μαγνητικής συμπεριφοράς ενός υλικού. Παρακάτω γίνεται η ανάλυση βήμα – βήμα του γραφήματος **B – H**.

**a:** Κατά την έναρξη της παρατήρησης, το δοκίμιο δε φέρει μαγνητικό φορτίο. Η αύξηση του εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου **H** κάποια στιγμή οδηγεί στο σημείο κορεσμού. Όταν το δοκίμιο κορεσθεί, όσο και να αυξηθεί το μαγνητικό πεδίο η μαγνητική επαγωγή του παραμένει σταθερή. Η τιμή της επαγωγής που αντιστοιχεί στο **σημείο κορεσμού** βασίζεται αποκλειστικά στις ιδιότητες του υλικού του δοκιμίου.

**b:** Στη συνέχεια μειώνεται η ένταση του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου μέχρι να μηδενιστεί. Σε αυτή τη φάση του βρόχου υστέρησης παρατηρείται μείωση της μαγνητικής επαγωγής του δοκιμίου, η οποία όμως δεν απομαγνητίζει πλήρως το φερρομαγνητικό υλικό και επηρεάζεται σύμφωνα με τις ιδιότητες του. Αυτή η ιδιότητα ονομάζεται **παραμένουσα μαγνήτιση** και συμβολίζεται με **M<sub>r</sub>** (remanent magnetization).

**c:** Εφαρμόζοντας μαγνητικό πεδίο αντίθετης φοράς, για μία ορισμένη τιμή έντασης του πεδίου η μαγνητική επαγωγή του υλικού μηδενίζεται. Αυτή η τιμή της έντασης του επιβαλλόμενου πεδίου που ονομάζεται **συνεκτικό πεδίο** και συμβολίζεται με **H<sub>c</sub>** (coercive field).

**d:** Στην επόμενη φάση παρατηρείται η συμπεριφορά που παρατηρήθηκε στην πρώτη φάση (a) αλλά με αντίθετη φορά. Με το αντίθετο επιβαλλόμενο πεδίο να με αυξάνεται μέχρι που το δοκίμιο φτάνει στο αρνητικό σημείο κορεσμού.

**e:** Αντίστοιχα με τη φάση b, το επιβαλλόμενο πεδίο μηδενίζεται και παρατηρείται ίση αλλά αντίθετης φοράς παραμένουσα μαγνήτιση στο δοκίμιο.



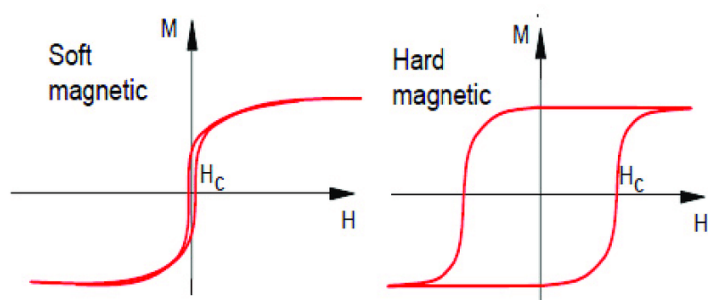
**f:** Τέλος, όπως και στη φάση c, εφαρμόζεται συνεκτικό πεδίο τέτοιο ώστε να μηδενίσει η μαγνητική επαγωγή του δοκιμίου.

Παρατηρείται από τα παραπάνω ότι μετά από την πρώτη φορά που μαγνητίζεται το δοκίμιο, η παραμένουσα μαγνήτιση του το καθιστά αδύνατο να απομαγνητιστεί χωρίς τη συνδρομή κατάλληλου συνεκτικού πεδίου.

Η παραμένουσα μαγνήτιση  $M_r$  προκαλεί την παραμένουσα μαγνητική επαγωγή  $B_r$ . Για τις δύο αυτές ιδιότητες των φερρομαγνητικών ισχύει η παρακάτω σχέση.

$$B_r = \mu_0 \cdot M_r \quad (1.14)$$

Η απαιτούμενη ένταση του συνεκτικού πεδίου εξαρτάται από το υλικό και την κρυσταλλική του δομή. Σύμφωνα με την τιμή του συνεκτικού πεδίου τα φερρομαγνητικά υλικά διαχωρίζονται σε σκληρά και μαλακά μαγνητικά υλικά. Παρατηρείται μια σύνδεση ανάμεσα στη μηχανική σκληρότητα και την τιμή του συνεκτικού πεδίου. Υλικά με μεγαλύτερη σκληρότητα έχουν μεγαλύτερη συνεκτικότητα και παραμένουσα μαγνήτιση σε σχέση με μαλακότερα υλικά, σκληρά και μαλακά μαγνητικά υλικά αντίστοιχα, όπως υποδεικνύει και η ονομασία.



Εικόνα 4 – Αριστερά: βρόχος υστέρησης μαλακού μαγνητικού υλικού, δεξιά: βρόχος υστέρησης σκληρού μαγνητικού υλικού [8]

### 1.2.3.2. Μαγνητική Διαπερατότητα

Για τα φερρομαγνητικά υλικά η μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$  έχει μεταβαλλόμενη τιμή. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή της διαπερατότητας είναι το είδος του υλικού, πιθανή παραμένουσα μαγνήτιση και το επιβαλλόμενο πεδίο μέσα στο οποίο τοποθετείται το υλικό. Ανακαλώντας την εξίσωση 1.7, αν γίνει η παραδοχή ότι τα διανύσματα των  $\mathbf{B}$  και  $\mathbf{H}$  είναι συγγραμμικά αυτή μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \Rightarrow B = \mu \cdot H \quad (1.15) \quad (\text{περίπτωση συγγραμμικών } B \text{ και } H)$$

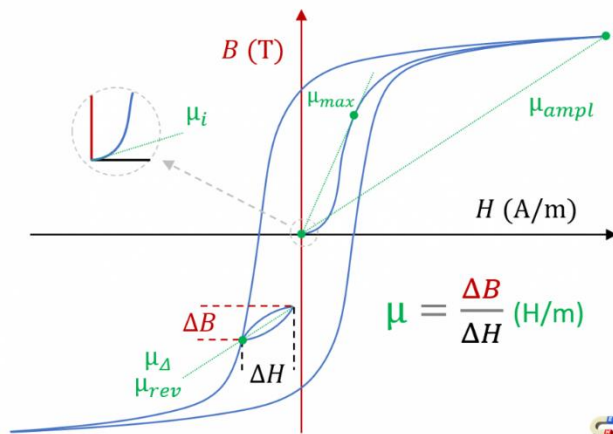
Από την εξίσωση 1.15 επιλύοντας ως προς την μαγνητική διαπερατότητα βρίσκουμε

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (1.16)$$

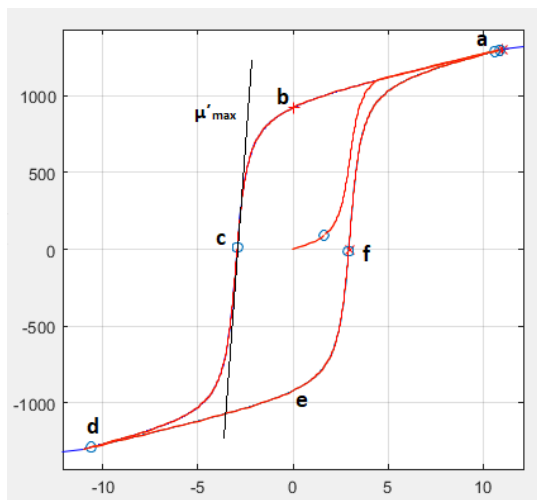
Όπως αναφέρεται για τον βρόχο υστέρησης, το  $\mu$  είναι μεταβλητό σύμφωνα με το μαγνητικό πεδίο μέσα στο οποίο βρίσκεται το υλικό. Επομένως ισχύει ότι σε μη σταθερές συνθήκες τα  $\mu$ ,  $B$  και  $H$  διαρκώς μεταβάλλονται. Εφαρμόζοντας διαφορικό λογισμό θεωρούνται στοιχειώδεις μεταβολές  $d\mathbf{H}$  και  $d\mathbf{B}$  σε στοιχειώδες χρονικό διάστημα  $dt$  κατά το οποίο θεωρείται ότι το  $\mu'$  παραμένει σταθερό. Αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ η μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$  δεν μας δίνει πολλές πληροφορίες καθώς είναι ένα μέγεθος το οποίο μπορεί να πάρει τιμές ανάμεσα στο 0 και στο άπειρο ανάλογα με την φάση της μαγνήτισης, η διαφορική μαγνητική διαπερατότητα που μας δείχνει το ρυθμό της μαγνήτισης είναι πολύ πιο χρήσιμη καθώς είναι δυνατό να συσχετιστεί με άλλες ιδιότητες του υλικού όπως τις εσωτερικές τάσεις και την κρυσταλλική του δομή [7]. Η  $\mu'$  δίνεται επομένως σύμφωνα με την παρακάτω σχέση.

$$\mu' = \frac{dB}{dH} \quad (1.17)$$

Σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο, αποδεικνύεται ότι η τιμή του  $\mu'$  είναι παράγωγος της μαγνητικής επαγωγής προς την ισχύ του μαγνητικού πεδίου.



Εικόνα 5 – Διάγραμμα των διάφορων φάσεων της στιγμιαίας μαγνητικής διαπερατότητας, υπολογισμένης σαν λόγος του  $B$  ως προς το  $H$ . Σημειώνεται ότι η  $\mu_{ampl}$  όπως αναφέρεται στο σχήμα παρακάτω ονομάζεται  $\mu_{max}$ . [9]

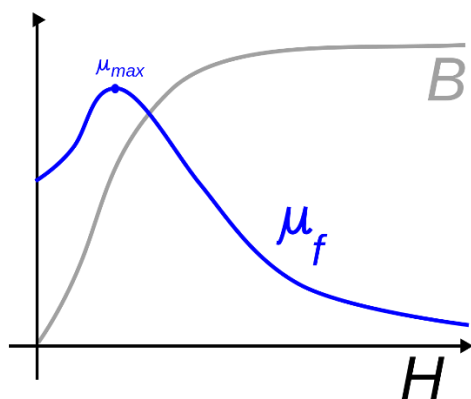


Εικόνα 6 – Γραφική αναπαράσταση της μέγιστης τιμής της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας  $\mu'_{max}$  στον βρόχο υστέρησης.

Η τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας εμφανίζει μέγιστο  $\mu_{max}$  (εικόνα 5) όταν το υλικό μεταβαίνει από την μη μαγνητισμένη αρχική του κατάσταση για πρώτη φορά, όπως φαίνεται στο σχήμα. Η μέγιστη τιμή της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας  $\mu'_{max}$  εμφανίζεται στα σημεία c και f της εικόνας 6, για την τιμή  $H_c$  του μαγνητικού πεδίου.

Στην παρούσα εργασία, για τον χαρακτηρισμό των μαγνητικών ιδιοτήτων και κατά προέκταση της κρυσταλλικής δομής και της κατάστασης των δοκιμίων (εσωτερικές τάσεις, κατασκευαστικές ατέλειες, ρηγματώσεις, θερμικές

καταπονήσεις) θα χρησιμοποιηθεί σαν μέγεθος αναφοράς η τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας στην κατάσταση κορεσμού, η οποία αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως  $\mu_{max}$ .



Εικόνα 7 – Η μέγιστη δυνατή διαπερατότητα εμφανίζεται στο σημείο κορεσμού του βρόχου υστέρησης. [10]

### 1.3. Δινορεύματα

Όταν ένα αγωγός εκτίθεται σε ένα εξωτερικά επιβαλλόμενο μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, τότε το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο διεισδύει στον αγωγό και δημιουργεί ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση του Μάξγουελ. Το ηλεκτρικό πεδίο με τη σειρά του δημιουργεί ηλεκτρικά ρεύματα τα οποία ονομάζονται δινορεύματα. Το μαγνητικό πεδίο, το επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο και τα δινορεύματα διεισδύουν στον αγωγό σε μια απόσταση

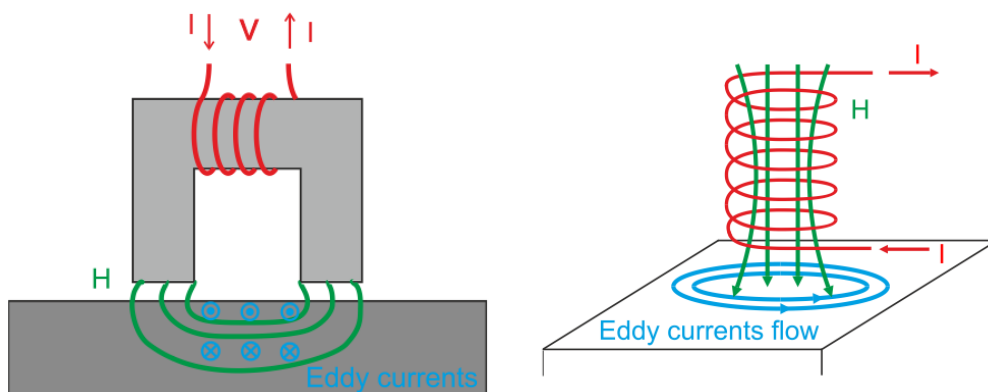
$$\delta \sim (\mu_0 \sigma \omega)^{-1/2} \quad (1.18)$$

όπου  $\sigma$  η ηλεκτρική αγωγιμότητα του μέσου και  $\omega$  η συχνότητα [11].

Ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο  $E$  :

$$\text{curl}E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1.19)$$

Τα δινορεύματα δύνανται να δημιουργηθούν τόσο από έκθεση αγωγού σε εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο όσο και από την σχετική κίνηση ενός σταθερού μαγνητικού πεδίου σε σχέση με τη θέση του αγωγού. Τέλος, τα δινορεύματα μέσω του παραγόμενου ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργούν, σύμφωνα με τον νόμο του Lenz, δημιουργούν και ένα αντίστοιχο μαγνητικό πεδίο το οποίο έχει φορά αντίθετη στη φορά του εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.



Εικόνα 8 – Δινορεύματα σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. [12]

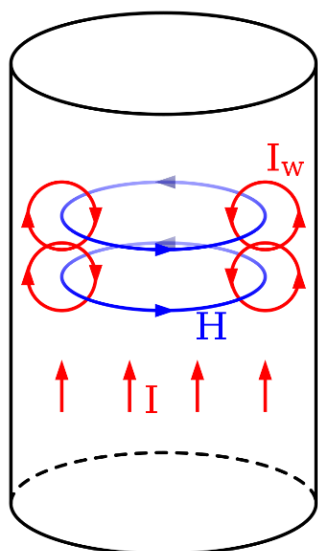
#### 1.4. Επιδερμικό φαινόμενο

Ένας αγωγός στην πράξη δεν διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα στην πληρότητα της διατομής του αλλά, τα μαγνητικά πεδία που σχηματίζονται μέσα σε αυτόν ωθούν τη ροή του ρεύματος προς τις εξωτερικές επιφάνειες του. Αυτή η ιδιότητα αυξάνει την αντίσταση ενός αγωγού και έχει ονομαστεί επιδερμικό φαινόμενο. Το βάθος της διείσδυσης αυτής ονομάζεται επιδερμικό βάθος και είναι υπαρκτό σε όλους του αγωγούς.

Το επιδερμικό φαινόμενο είναι επαγωγικό φαινόμενο και σχετίζεται με τη συχνότητα της εναλλαγής των μαγνητικών πεδίων εντός του αγωγού. Όσο αυξάνεται η συχνότητα τόσο αυξάνεται η ένταση του φαινομένου. Υπάρχει μια συχνότητα αποκοπής  $\omega_{\delta}$  κάτω από την οποία το επιδερμικό φαινόμενο εξακολουθεί να υπάρχει αλλά θεωρείται αμελητέο [13]. Από τη συχνότητα αποκοπής και για μεγαλύτερες τιμές το επιδερμικό φαινόμενο ωθεί τη ροή του ρεύματος σε όλο και μικρότερες περιοχές πιο κοντά στην εξωτερική επιφάνεια του αγωγού, αυξάνοντας την αντίσταση του, ενώ για τιμές κάτω από την  $\omega_{\delta}$  ο αγωγός διατηρεί σταθερή αντίσταση.

Όπως μπορεί να προϋδεάζει η χρήση του  $\delta$  και η εξίσωση 1.18, το επιδερμικό φαινόμενο σχετίζεται με τα δινορεύματα. Όσο πιο ταχύρρυθμη η εναλλαγή του ηλεκτρικού ρεύματος, τόσο πιο έντονη η παρουσία και η επίδραση των δινορευμάτων μέσω των μαγνητικών πεδίων που παράγουν.

Στην παρούσα εργασία, θα χρησιμοποιηθούν χαμηλόσυχνα μαγνητικά πεδία και ως εκ τούτου δεν θα ληφθεί υπόψη το συγκεκριμένο φαινόμενο στους υπολογισμούς καθώς θα βρίσκεται χαμηλότερα στο πεδίο των συχνοτήτων από την συχνότητα αποκοπής του φαινομένου.

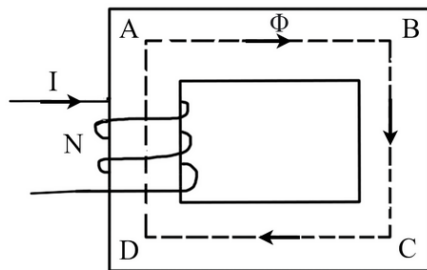


Εικόνα 9 – Σχηματική αναπαράσταση της δημιουργίας του επιδερμικού φαινομένου. Η ροή του ρεύματος  $I$  δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο  $H$  που προκαλεί τη δημιουργία δινορευμάτων. [14]

## 1.5. Μαγνητικά Κυκλώματα

Μαγνητικά κυκλώματα ονομάζονται οι διατάξεις που λειτουργούν σαν κλειστοί βρόχοι μαγνητικής ροής. Ένα τέτοιο κύκλωμα μπορεί να περιέχει μία ή περισσότερες πηγές μαγνητικής ροής, οι οποίες μπορεί να είναι μόνιμοι μαγνήτες ή ηλεκτρομαγνήτες. Ούτως ώστε το μαγνητικό πεδίο να είναι αξιοποιήσιμο, εύκολα μετρήσιμο και να μην διαχέεται αναίτια, χρησιμοποιούνται αγωγοί του μαγνητισμού. Συνήθεις τέτοιο αγωγοί είναι φερομαγνητικά υλικά, και το συνηθέστερο είναι ο σίδηρος.

Έχει αποδειχτεί ότι υπάρχει μια αναλογία ανάμεσα στους νόμους που διέπουν τα ηλεκτρικά κυκλώματα και σε αυτούς που διέπουν τα μαγνητικά κυκλώματα. Έτσι βοηθάται ο σχεδιασμός μαγνητικών κυκλωμάτων και είναι πιο εύκολη η ανάπτυξη συσκευών όπως οι μετασχηματιστές και οι ηλεκτροκινητήρες.



Εικόνα 10 – Αναπαράσταση απλού μαγνητικού κυκλώματος. [15]

Στην παραπάνω εικόνα περιγράφεται ένα μαγνητικό κύκλωμα που αποτελείται από ένα πηνίο  $N$  περιελίξεων και τον πυρήνα γύρω από τον οποίο είναι τυλιγμένο το πηνίο. Όταν το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα  $I$ , λειτουργεί ως πηγή και δημιουργεί τη μαγνητική ροή που συμβολίζεται με  $\Phi$  στην εικόνα στον αγωγό. Η μαγνητική ροή εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος  $I$  και τον αριθμό των περιελίξεων  $N$ . Παρατηρείται σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί στο παρόν κεφάλαιο, η μαγνητική ροή βρίσκεται εντός του πυρήνα-αγωγού και θεωρείται ότι δεν διαφεύγει σημαντική ποσότητα από το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο.

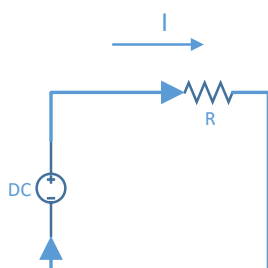
### 1.5.1. Δυϊσμός των μαγνητικών κυκλωμάτων

Όπως αναφέρθηκε εν συντομία, τα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά κυκλώματα μπορούν να θεωρηθούν ότι λειτουργούν σε αντιστοιχία. Στα ηλεκτρικά κυκλώματα ισχύει ο νόμος του Ωμ (εξίσωση 1.20). Στα μαγνητικά κυκλώματα ισχύει αντίστοιχα ο νόμος του Χόπκινσον (εξίσωση 1.21).

$$V = I \cdot R \quad (1.20)$$

$$F = \Phi \cdot R_m \quad (1.21)$$

Όπου  $F$  η μαγνητοεγερτική δύναμη,  $\Phi$  η μαγνητική ροή εντός του μαγνητικού υλικού και  $R_m$  η μαγνητική αντίσταση του κυκλώματος.



Εικόνα 11 – Αντίστοιχο ηλεκτρικό κύκλωμα του μαγνητικού της εικόνας 10.

Η αντιστοιχία αυτή βέβαια ανάμεσα σε μαγνητικά και ηλεκτρικά κυκλώματα δεν είναι κάτι άλλο πέρα από μια σύμβαση που γίνεται για να διευκολυνθεί η κατανόηση και ο σχεδιασμός. Ως εκ τούτου υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί στην αντιστοιχία τους. Ενώ το ηλεκτρικό ρεύμα αποτελείται από μια ροή ηλεκτρονίων μέσα σε έναν αγωγό και είναι στην πραγματικότητα κίνηση ύλης, μια μαγνητική ροή δεν συνοδεύεται από κάποιο αντίστοιχο φαινόμενο. Ως συνέπεια της προηγούμενης παρατήρησης, μια ηλεκτρική ροή μεταφέρει ενέργεια με τρόπο τέτοιο που ένα τμήμα της απελευθερώνεται ως θερμότητα, κάτι που δε συμβαίνει με την μαγνητική ροή.



Στο παρακάτω πίνακα αναλύεται η αντιστοιχία ανάμεσα στα δύο είδη κυκλωμάτων που αναφέρονται.

|  | Μαγνητικό κύκλωμα   | Ηλεκτρικό κύκλωμα   |
|--|---|---|
| Ορισμός  | Ο κλειστός βρόχος μαγνητικής ροής ονομάζεται μαγνητικό κύκλωμα  | Ο κλειστός βρόχος ηλεκτρικής ροής ονομάζεται ηλεκτρικό κύκλωμα  |
| Συσχέτιση Μαγνητικής και ηλεκτρικής ροής (ρεύμα) | <b>Μαγνητική ροή</b> = μαγνητοεγερτική δύναμη / μαγνητική αντίσταση. Η μαγνητική ροή $\Phi$ μετράται σε weber (wb)  | <b>Ρεύμα</b> = ηλεκτρεγερτική δύναμη / αντίσταση. Το ηλεκτρικό ρεύμα $I$ μετράται σε Ampere                             |
| Μαγνητοεγερτική και ηλεκτρεγερτική δύναμη        | Η <b>μαγνητοεγερτική δύναμη</b> (mmf) είναι η αιτία της μαγνητικής ροής και μετράται σε αμπεροστροφές (Ampere turns) AT<br>$mmf = \int H \cdot dl$  | Η <b>ηλεκτρεγερτική δύναμη</b> (emf) είναι η αιτία του ηλεκτρικού ρεύματος και μετράται σε V<br>$emf = \int E \cdot dl$ |
| Μαγνητική και ηλεκτρική αντίσταση                | Η <b>μαγνητική αντίσταση</b> αντιστέκεται στην μαγνητική ροή<br>$\mathfrak{R} = \frac{l}{A\mu}$ και μετράται σε AT/wb (όπου A η διατομή του αγωγού, $\mu$ η διαπερατότητα, $l$ το μήκος του αγωγού) | Η <b>ηλεκτρική αντίσταση</b> αντιστέκεται στη ροή του ρεύματος $R = \rho \frac{l}{A}$ και μετράται σε $\Omega$ .        |

|  |   |  |
|--|---|--|
| Αναλογία διαπερατότητας και αγωγιμότητας | Η <b>διαπερατότητα</b> είναι το πόσο εύκολα ρέει η μαγνητική ροή μέσω του αγωγού. Ορίζεται ως $\mu = \frac{B}{H}$   | Η <b>αγωγιμότητα</b> είναι το πόσο εύκολα ρέει η ηλεκτρική ροή μέσω του αγωγού. Ορίζεται ως $G = \frac{1}{R}$                            |
| Πυκνότητα ροής                           | Η πυκνότητας της μαγνητικής ροής δίνεται από τον τύπο $B = \frac{\Phi}{A}$ (wb/m <sup>2</sup> )   | Η πυκνότητας της ηλεκτρικής ροής δίνεται από τον τύπο $J = \frac{I}{A}$ (A/m <sup>2</sup> )  |
| Μαγνητική ροή και ηλεκτρική ροή          | Η μαγνητική ροή έχει ως αιτία της τον προσανατολισμό των ηλεκτρονίων.   | Η ηλεκτρική ροή έχει ως αιτία της την κίνηση των ηλεκτρονίων.  |
| Ενέργεια μέσα στο κύκλωμα                | Η μαγνητική ροή μετά από την καθιέρωση της στο κύκλωμα δεν καταναλώνεται. Μόνο κατά το αρχικό στάδιο της καθιέρωσης καταναλώνεται ένα μικρό ποσό ενέργειας για τον προσανατολισμό των μαγνητικών περιοχών των υλικών. | Σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, όσο υπάρχει ροή ηλεκτρονίων καταναλώνεται ενέργεια μέσω αυτής, η οποία απελευθερώνεται με τη μορφή θερμότητας. |
| Εφαρμοζόμενες αρχές                      | Οι κανόνες του Κίρχοφ εφαρμόζονται.   | Οι κανόνες του Κίρχοφ εφαρμόζονται.  |

Πίνακας 1 – Αντιστοιχίες και διαφορές ηλεκτρικών και μαγνητικών κυκλωμάτων.

### 1.5.2. Κανόνες και Νόμοι που Διέπουν τα Μαγνητικά Κυκλώματα

Όπως αναφέρθηκε, σε αντιστοιχία με τα ηλεκτρικά κυκλώματα, ορισμένοι κανόνες και νόμοι εφαρμόζονται και στα μαγνητικά κυκλώματα. Ενώ παρομοιάζουν τα ηλεκτρικά κυκλώματα είναι στην πραγματικότητα διαφορετικοί κανόνες, οι οποίοι παρά αυτό το γεγονός, είναι τόσο όμοιοι που όπως φαίνεται και στον πίνακα 1, για τους λόγους που έχουν αναφερθεί οδηγούν τους ερευνητές και τους μηχανικούς να χρησιμοποιούν τις ίδιες ονομασίες και για τους δύο.

- Νόμος του Ρόουλαντ:

$$\Phi = \frac{F}{R_m} \quad (1.22)$$

όπου  $F$  η μαγνητοεγερτική δύναμη,  $\Phi$  η μαγνητική ροή του κυκλώματος και  $R_m$  η μαγνητική αντίσταση. Η αντιστοιχία του νόμου αυτού στον ηλεκτρισμό είναι ο νόμος του Ωμ.

$$I = \frac{E}{R} \quad (1.23)$$

Όπου  $E$  η ηλεκτρεγερτική δύναμη,  $I$  η ένταση του ρεύματος και  $R$  η αντίσταση.

- Κανόνες του Κίρχοφ για τα μαγνητικά κυκλώματα:

1. Η διαφορά μαγνητικού δυναμικού εντός ενός βρόχου ενός μαγνητικού κυκλώματος είναι μηδέν.

$$\sum F = 0 \quad (1.24)$$

2. Για κυκλώματα σε παραλληλία, το άθροισμα της έντασης των μαγνητικών ροών που ρέουν προς έναν κόμβο ισούται με το άθροισμα της έντασης των μαγνητικών ροών που ρέουν από αυτόν τον κόμβο.

$$\sum_{i=1}^n \Phi_i = 0 \Leftrightarrow \Phi_{total} = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \dots + \Phi_n \quad (1.25)$$

### 1.5.3. Μαγνητοεγερτική Δύναμη

Αναπτύχθηκε παραπάνω ο τύπος ( $F = \Phi \cdot R_m$  εξίσωση 1.21) από τον οποίο υπολογίζεται η μαγνητοεγερτική δύναμη  $F$ . Ένας άλλος τρόπος ορισμού της είναι

$$F = n \cdot I \quad (1.26)$$

όπου  $n$  είναι ο αριθμός των περιελίξεων του πηνίου διέγερσης (πηγή του μαγνητικού κυκλώματος) και  $I$  το ρεύμα που το διαρρέει. Η ισχύς του ρεύματος στο πηνίο καθορίζει την ενέργεια που χάνεται σαν θερμότητα στο σύστημα και είναι σημαντικός παράγοντας στον σχεδιασμό ενός συστήματος. Λόγω της αντιστοιχίας της μαγνητοεγερτικής δύναμης με την ηλεκτρεγερτική συναντάται και με την ονομασία μαγνητικό δυναμικό. Ένας άλλος τύπος που δείχνει την  $F$  σαν συνάρτηση της ισχύος του μαγνητικού πεδίου είναι ο παρακάτω

$$F = H \cdot l \quad (1.27)$$

όπου  $l$  το μήκος της πηγής.

#### 1.5.4. Μαγνητικές Αντιστάσεις

Από την εξίσωση 1.21 συμπεραίνεται ότι η τιμή της μαγνητικής αντίστασης  $R_m$  είναι

$$R_m = \frac{F}{\Phi} \quad (1.28)$$

και η λειτουργία της είναι αντίστοιχη, όπως αναφέρθηκε στον πίνακα 1, με αυτή της ηλεκτρικής αντίστασης. Όπως και στα ηλεκτρικά κυκλώματα για το ρεύμα, έτσι και στα μαγνητικά η μαγνητική ροή επιλέγει τις διαδρομές με τη χαμηλότερη αντίσταση. Για κυκλώματα σε σειρά, η συνολική μαγνητική αντίσταση ισούται με τη μαγνητική αντίσταση όλων των επιμέρους αντιστάσεων.

$$R_{total} = R_{m1} + R_{m2} + R_{m3} + \dots + R_{mi} \quad (1.29)$$

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να αναλυθεί στην παρακάτω μορφή.

$$R_{total} = \frac{l_1}{\mu_1 \cdot A_1} + \frac{l_2}{\mu_2 \cdot A_2} + \frac{l_3}{\mu_3 \cdot A_3} + \dots + \frac{l_i}{\mu_i \cdot A_i} \quad (1.30)$$

Όπου  $l_i$  το μήκος του αγωγού,  $\mu_i$  η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού και  $A_i$  η επιφάνεια της διατομής του αγωγού

#### 1.6. Έλεγχος Υγείας Υλικών

Ο έλεγχος της υγείας ενός υλικού χωρίζεται ανάλογα με το αν χρειάζεται για την πραγματοποίηση του ελέγχου η καταστροφή ή μη του δοκιμίου σε δύο ευρείες κατηγορίες, τον καταστροφικό και τον μη καταστροφικό έλεγχο. Και οι δύο μορφές ελέγχου είναι αξιόπιστα εργαλεία και χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό της

υγείας των ίδιων υλικών, όπου αυτό είναι δυνατό. Αυτό που οδηγεί στην επιλογή της μιας ή της άλλης είναι ένα σύνολο ιδιοτήτων του προς έλεγχο υλικού.

Σε περιπτώσεις όπου το κόστος του υλικού είναι χαμηλό για παράδειγμα, προτιμάται ο καταστροφικός έλεγχος. Επίσης προτιμάται όταν ένα δοκίμιο δεν είναι δύσκολο να παραχθεί ή δεν είναι μοναδικό, όπως για παράδειγμα στο τέλος της γραμμής παραγωγής μιας χαλυβουργίας. Ο μη καταστροφικός έλεγχος από την άλλη μπορεί να είναι μια πιο κοστοβόρα διαδικασία, όμως έχει τα πλεονεκτήματα ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς την ανεπανόρθωτη αλλοίωση του δοκιμίου, έτσι εφαρμόζεται εκεί όπου δεν μπορεί να εφαρμοστεί για οποιονδήποτε λόγο ο καταστροφικός έλεγχος, για παράδειγμα σε έργα τέχνης, σε βιομηχανικά εξαρτήματα εξαιρετικού κόστους ή δυσκολίας παραγωγής όπως μηχανές πλοίων, άξονες μετάδοσης σε ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες και πολλά άλλα.

Ορισμένες μορφές καταστροφικού ελέγχου είναι οι ακόλουθες:

- Έλεγχος αντοχής σε ακραία περιβάλλοντα – περιλαμβάνει την έκθεση σε περιβάλλοντα που κοπώνουν τα υλικά όπως έντονη υγρασία, παρουσία οξειδωτικών αερίων, έντονες θερμοκρασίες και πιέσεις (χαμηλές και υψηλές).
- Έλεγχος οξείδωσης – έκθεση σε μη τοξικά υδάτινα διαλύματα όπως γλυκό και θαλασσινό νερό.
- Έλεγχος μηχανικής αντοχής και θραύσης – τα δοκίμια υπόκεινται σε διαφορετικές μορφές ελέγχου των μηχανικών τους δυνατοτήτων, όπως κάμψη μέχρι την πλαστική παραμόρφωση, την πλήρη θραύση, αντοχή στον εφελκυσμό, έλεγχος σκληρότητας, έλεγχος κρούσης, έλεγχος ρηγμάτωσης.
- Έλεγχος κόπωσης – εφαρμόζεται για την εύρεση της αντοχής συγκολλητών δοκιμίων.
- Έλεγχος υδρογόνου – εφαρμόζεται για την εύρεση της αντοχής δοκιμίων που είναι ευπαθή ενάντια στο υδρογόνο.

- Έλεγχος παραμενουσών τάσεων – γίνεται με πλήθος καταστροφικών και μη μεθόδων. Στις καταστροφικές μεθόδους γίνεται τμηματική αποσύνθεση του δοκιμίου και οι μετρήσεις γίνονται στα αποτετμημένα μέρη του δοκιμίου.

Ορισμένες μορφές μη καταστροφικού ελέγχου είναι οι ακόλουθες:

- Οπτικός έλεγχος – η πιο απλή μορφή ελέγχου. Αποτελείται από τη διεξοδική παρατήρηση ενός αντικειμένου μόνο με τα γυμνά μάτια και με τα χέρια του ελεγκτή. Παρά την απλότητα της, ανάλογα με την εμπειρία του ελεγκτή μπορεί να είναι εξαιρετικά ακριβής.
- Υπέρηχοι – με αυτή τη μέθοδο, υπέρηχοι διοχετεύονται μέσω του υλικού και μέσω κατάλληλων διατάξεων ανιχνεύονται οι διαταράξεις στην ηχώ που προκαλούν σε αυτούς τυχόν κατασκευαστικές ατέλειες ή ρηγματώσεις ή λοιπές ασυνέπειες.
- Ραδιογραφία – αξιοποιεί ακτίνες-Χ ή ακτίνες-Γ για την ανίχνευση ατελειών.
- Δινορεύματα – αξιοποιεί τα δινορεύματα και τις ασυνέχειες που δημιουργούν οι ατέλειες σε ένα υλικό στην ροή τους.
- Μαγνητικά σωματίδια – το υλικό μαγνητίζεται και στη συνέχεια καλύπτεται από ένα λεπτό στρώμα μαγνητικού υλικού το οποίο επιτρέπει τον οπτικό έλεγχο των ασυνεπειών που δημιουργούνται στο μαγνητικό πεδίο από τυχόν ατέλειες.
- Ακουστικός έλεγχος – με τη χρήση κατάλληλων αισθητήρων μετρώνται και αναλύονται ηχητικά κύματα που διοχετεύονται σε ένα υλικό από τις ίδιες τις εσωτερικές του τάσεις ή ατέλειες.
- Διεισδυτικά υγρά – χρωματιστά υγρά εξαιρετικά μικρού ιξώδους καλύπτουν την εξωτερική επιφάνεια του υλικού και στη συνέχεια το δοκίμιο σκουπίζεται και εξετάζεται οπτικά. Όπου έχει παραμείνει χρώμα (υγρό) εντοπίζεται ατέλεια.
- Μαγνητικοί αισθητήρες - Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ο μη καταστροφικός έλεγχος με χρήση των μαγνητικών ιδιοτήτων. Όπως αναφέρεται στον παρόν κεφάλαιο, κάθε υλικό σύμφωνα με τη σύσταση και την κρυσταλλική

του δομή έχει συγκεκριμένες μαγνητικές ιδιότητες. Μετρώντας αυτές τις ιδιότητες στην υγιή κατάσταση ενός δοκιμίου αυτή γίνεται πλέον γνωστή και αποκλίσεις από αυτή μπορούν να χαρακτηριστούν ως ατέλειες.

### 1.7. Μαγνητικοί αισθητήρες

Οι μαγνητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση μαγνητικών πεδίων με τη μορφή μαγνητικής ροής, ισχύος μαγνητικού πεδίου και διεύθυνσης. Τα δεδομένα από τους μαγνητικούς αισθητήρες, αλλαγές και αλλοιώσεις του μαγνητικού πεδίου, μπορούν να αξιοποιηθούν για την παρακολούθηση της θέσης, της διεύθυνσης, της περιστροφής και της γωνίας των αντικειμένων, την παρουσία ηλεκτρικού ρεύματος, μαγνητικής ροής και λοιπών άλλων φαινομένων και καταστάσεων. Για τον λόγο αυτό, οι μαγνητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία, στα αυτοκίνητα, την ρομποτική και σε πολλούς ακόμα τομείς.

#### 1.7.1. Αισθητήρες Μαγνητικής Ροής

Το πιο κοινό είδος μαγνητικού αισθητήρα είναι το σωληνοειδές. Είναι ένα πηνίο με μήκος μεγαλύτερο από τη διάμετρο του και λειτουργεί ως ηλεκτρομαγνήτης που δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του. Ο νόμος του Φαραντέι περιγράφει τη συμπεριφορά του.

$$V_{out} = -N \cdot A \cdot \frac{dB}{dt} \quad (1.31)$$

Όπου N ο αριθμός των περιελίξεων του πηνίου, A η επιφάνεια της διατομής του πηνίου και B η πυκνότητα της μαγνητικής ροής. Συνδυάζοντας την 1.31 με την 1.15



$$V_{out} = -\mu \cdot N \cdot A \cdot \frac{dH}{dt} \quad (1.32)$$

Όπου  $H$  είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου και  $\mu$  η μαγνητική διαπερατότητα.

Συνηθίζεται οι σωληνοειδείς αισθητήρες να συνδυάζονται με φερρομαγνητικούς πυρήνες καθώς ο συνδυασμός των δύο έχει ως αποτέλεσμα μια πολύ σημαντική ενίσχυση του σήματος που παράγουν ή δέχονται.

### 1.7.2. Αισθητήρες Μαγνητικής Διαπερατότητας

Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκε αισθητήρας κατάλληλος για τη μέτρηση της μαγνητικής διαπερατότητας. Οι αισθητήρες αυτού του τύπου αποτελούνται από τρία σταθερά μέλη, ενώ το τέταρτο μέλος είναι το δοκίμιο που μετράται. Αναλυτικά αποτελείται από τα εξής:

- Τον πυρήνα (yoke) – έχει σχήμα  $\cup$  και συνήθως είναι κατασκευασμένος από εξαιρετικά μαγνητικά αγώγιμο ηλεκτρικό χάλυβα
- Το πηνίο διέγερσης – το πηνίο που λειτουργεί ως πηγή του μαγνητικού κυκλώματος, είναι συνδεδεμένο με την πηγή της ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω της οποίας παράγει το επιθυμητό μαγνητικό σήμα με κατάλληλες επιβολές του ηλεκτρικού σήματος
- Το δοκίμιο – το υλικό του οποίου μετράται η μαγνητική διαπερατότητα. Όπως φαίνεται στο σχήμα της εικόνας 12 βρίσκεται ανάμεσα στα δύο άκρα του yoke και αποτελεί αγωγό του μαγνητικού κυκλώματος.
- Το πηνίο λήψης – το πηνίο που ολοκληρώνει το μαγνητικό κύκλωμα. Η μαγνητική ροή περνά στην τελική φάση από το πηνίο λήψης το οποίο την μετατρέπει σε ηλεκτρική ροή και είναι συνδεδεμένο με παλμογράφο. Έτσι μέσω μετέπειτα μετασχηματισμών μετράται η μαγνητική διαπερατότητα.

## 1.8. Ηλεκτρικός Χάλυβας

Συνήθως στους μαγνητικούς αισθητήρες χρησιμοποιείται κάποιας μορφής φερρομαγνητικός πυρήνας ο οποίος συγκεντρώνει τις μαγνητικές γραμμές στη διατομή του. Η πιο συνηθισμένη από αυτές της μορφές είναι ο ηλεκτρικός χάλυβας που συναντάται στους περισσότερους μετασχηματιστές. Οι ηλεκτρικοί χάλυβες είναι μια κατηγορία κραμάτων των οποίων η σχετική μαγνητική διαπερατότητα είναι της τάξης των 4000 φορές αυτής του κενού. Διαχωρίζονται σε υποκατηγορίες ανάλογα με την κραματική τους σύσταση, την ικανότητα τους να κατεργάζονται μηχανικά και τον προσανατολισμό των κόκκων τους.

Ιδιότητες που ζητώνται από τους ηλεκτρικούς χάλυβες είναι:

- Η υψηλή διαπερατότητα η οποία αυξάνει την ικανότητα του υλικού να άγει μαγνητικά πεδία.
- Η υψηλή ηλεκτρική αντίσταση για την μείωση των απωλειών από δινορεύματα.
- Χαμηλή μαγνητοσυστολή για την διατήρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του υλικού.
- Η χαμηλή μαγνητική υστέρηση για την μείωση της ενέργειας που διοχετεύεται στο περιβάλλον με τη μορφή θερμότητας εξαιτίας της εναλλαγής του μαγνητικού πεδίου. [16]

Με βάση την κρυσταλλική τους δομή διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- Μη προσανατολισμένοι – πλήρως επεξεργασμένοι ηλεκτρικοί χάλυβες. Περιέχουν συνήθως από 0.5 μέχρι 3.25% πυρίτιο. Έχουν ομοιόμορφες μαγνητικές ιδιότητες προς όλες τις διευθύνσεις και δεν απαιτούν ανόπτηση για την ανάπτυξη των ιδιοτήτων τους. Έχουν χαμηλή κατεργασιμότητα.
- Μη προσανατολισμένοι – ημιεπεξεργασμένοι ηλεκτρικοί χάλυβες. Συνήθως δεν περιέχουν πυρίτιο και δέχονται ανόπτηση σε χαμηλές θερμοκρασίες μετά

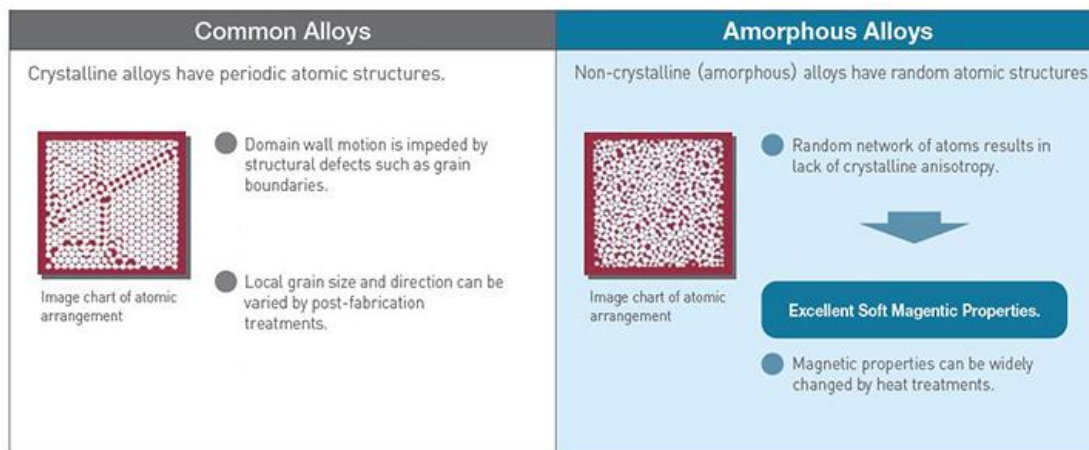
από την διαδικασία της ψυχρής έλασης. Η κατεργασιμότητα τους είναι καλύτερη από τους μη προσανατολισμένους – πλήρως επεξεργασμένους χάλυβες.

- Προσανατολισμένοι ηλεκτρικοί χάλυβες. Έχουν περιεκτικότητα 3% σε πυρίτιο και κόκκους προσανατολισμένους για να επιτυγχάνουν υψηλή διαπερατότητα και χαμηλή απώλεια ενέργειας. Ο προσανατολισμός επιτυγχάνεται με χρήση μια διαδικασίας επανακρυσταλλοποίησης που ενισχύει την κρυσταλλική δομή ώστε να επιτυγχάνονται καλύτερες μαγνητικές ιδιότητες κατά τη διεύθυνση της έλασης του ελάσματος. [17]

Κάθε κατηγορία ηλεκτρικού χάλυβα ενδείκνυται για διαφορετικές εφαρμογές, που έχουν να κάνουν με τις μαγνητικές που απαιτεί η εφαρμογή.

### 1.9. Metglas

Το Metglas είναι ένας άμορφος κραματικός χάλυβας ο οποίος, σε αντίθεση με τους ηλεκτρικούς χάλυβες, δεν χαρακτηρίζεται από κρυσταλλική δομή. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της παραγωγικής διαδικασίας του κράματος, το οποίο ψύχεται από την υγρή φάση στην στερεή με ρυθμό περίπου ένα εκατομμύριο βαθμούς Κελσίου ανά δευτερόλεπτο. Η ιδιότητα του αυτή το οδηγεί σε ιστροπική συμπεριφορά, το οποίο σημαίνει έλλειψη μαγνητικών περιοχών και κατά προέκταση εξαιρετική μαγνητική συμπεριφορά, με υψηλή μαγνητική διαπερατότητα, χαμηλές απώλειες και υψηλή τιμή κορεσμού πυκνότητας μαγνητικής ροής [18].



Εικόνα 12 – Κρυσταλλική δομή σε μέταλλα με κρυσταλλική δομή (αριστερά) και σε άμορφα μέταλλα (δεξιά) [18]

Οι πυρήνες από Metglas αποτελούνται, όπως και οι πυρήνες από ηλεκτρικούς χάλυβες, από λεπτά ελάσματα μετάλλου τα οποία συσφίγγονται μεταξύ τους. Μονώνονται και προστατεύονται από την υγρασία και την μεταξύ τους αγωγή από κατάλληλα βερνίκια. Παρακάτω παρατίθεται πίνακας με την μαγνητική διαπερατότητα ορισμένων από τα πιο διαδεδομένα μέταλλα για πυρήνες μετασχηματιστών σε σχέση με το κενό.

| Medium  | Susceptibility, volumetric, SI, $\chi_m$ | Relative permeability, max., $\mu/\mu_0$ | Permeability, $\mu$ (H/m)              | Magnetic field | Frequency, max. |
|---|--|--|--|----------------|-----------------|
| Vacuum  | 0  | 1, exactly                               | $1.25663706212 \times 10^{-6} (\mu_0)$ |                |                 |
| Metglas 2714A (annealed)                          |  | 1000000                                  | $1.26 \times 10^0$                     | At 0.5 T       | 100 kHz         |
| Iron (99.95% pure Fe annealed in H)               |  | 200000                                   | $2.5 \times 10^{-1}$                   |                |                 |
| Permalloy   | 8000                                     | 100000                                   | $1.25 \times 10^{-1}$                  | At 0.002 T     |                 |
| NANOPERM®   |  | 80000                                    | $1.0 \times 10^{-1}$                   | At 0.5 T       | 10 kHz          |
| Mu-metal  |  | 50000                                    | $6.3 \times 10^{-2}$                   |                |                 |
| Mu-metal  |  | 20000                                    | $2.5 \times 10^{-2}$                   | At 0.002 T     |                 |
| Cobalt-iron<br>(high permeability strip material) |  | 18000                                    | $2.3 \times 10^{-2}$                   |                |                 |
| Iron (99.8% pure)                                 |  | 5000                                     | $6.3 \times 10^{-3}$                   |                |                 |
| Electrical steel                                  |  | 4000                                     | $5.0 \times 10^{-3}$                   | At 0.002 T     |                 |

Εικόνα 13 – Μαγνητική διαπερατότητα των πιο διαδεδομένων ηλεκτρικών υλικών. (Εικόνα προσαρμοσμένη από [19])

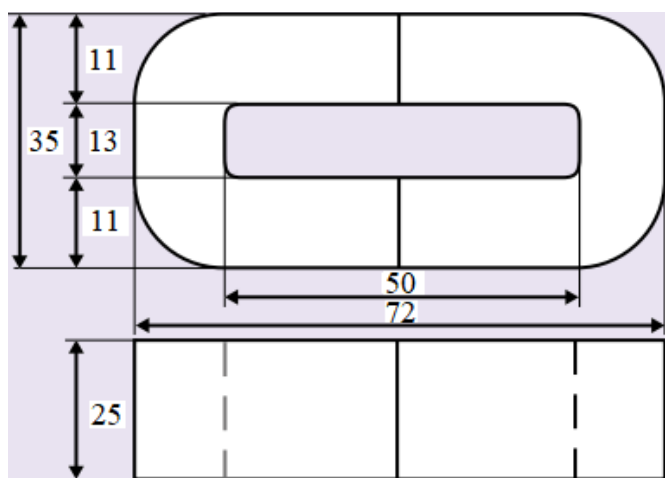
## 2. Πειραματικό Μέλος

Στο πειραματικό μέλος θα περιγραφεί η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε ως αισθητήρας, ο εξοπλισμός που αξιοποιήθηκε για το πείραμα και τα δοκίμια που μετρήθηκαν. Στη συνέχεια θα περιγραφεί η διαδικασία της μέτρησης και οι ιδιαιτερότητες που εμφανίστηκαν. Τέλος, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα του πειράματος και θα γίνει ανάλυση τους.

### 2.1. Περιγραφή της Διάταξης

Ο αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις κατασκευάστηκε από το εργαστήριο της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Αποτελείται από έναν πυρήνα άμορφου ηλεκτρικού χάλυβα τύπου Metglas, και δύο πηνία περιελιγμένα σε δύο μπομπίνες από πλαστικό που τυπώθηκαν σε τρισδιάστατο εκτυπωτή.

Οι διαστάσεις του πυρήνα φαίνονται στην παρακάτω εικόνα και η μάζα του είναι 281g.



Εικόνα 14 – Σχηματική αναπαράσταση του πυρήνα από Metglas, όλες οι διαστάσεις αναγράφονται σε mm. Σχήμα αναπαραγόμενο από [20].

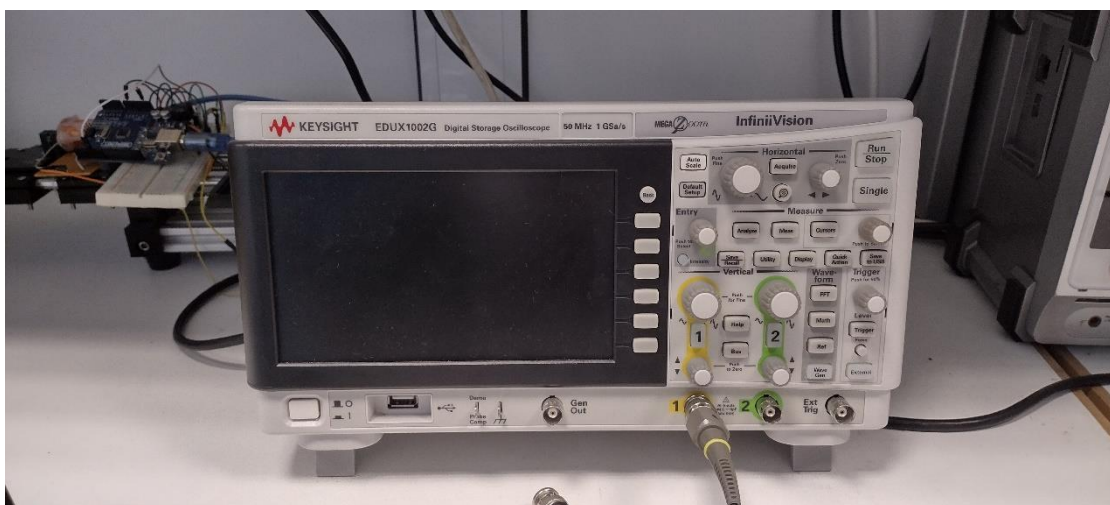
Το πηνίο διέγερσης κατασκευάστηκε από χάλκινο σύρμα  $\varnothing 0.5\text{mm}$  με επίστρωση σμάλτου για μόνωση. Αποτελείται από 130 περιστροφές και έχει χαρακτηριστικά  $1.7\text{mH}$  επαγωγή και  $1.4\Omega$  ηλεκτρική αντίσταση. [20]

Το πηνίο λήψης κατασκευάστηκε από χάλκινο σύρμα  $\varnothing 0.1\text{mm}$  με επίστρωση σμάλτου για μόνωση. Αποτελείται από 2000 περιστροφές και έχει χαρακτηριστικά  $612\text{mH}$  επαγωγή και  $516\Omega$  ηλεκτρική αντίσταση. [20]

## 2.2. Εργαστηριακός Εξοπλισμός



Εικόνα 15 – Ο ενισχυτής που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα.



Εικόνα 16 – Ο παλμογράφος που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα.

### 2.3. Δοκίμια που Χρησιμοποιήθηκαν

Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια ηλεκτρικού χάλυβα ψυχρής έλασης που παραχωρήθηκαν από το εργαστήριο του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ. Στην συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκαν τρία είδη δοκιμών τα οποία έχουν εξεταστεί στο παρελθόν ως προς τις ιδιότητες τους και ορισμένες από αυτές έχουν γίνει γνωστές. Οι διαστάσεις των δοκιμών είναι 300mm x 30mm. Παρατίθεται πίνακας με βασικά χαρακτηριστικά των τριών σειρών.

| Σειρά 1 - TS               |       |       |       |       |        |       |       |       |       |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| Δοκίμιο                    | TS-01 | TS-02 | TS-03 | TS-04 | TS-05  | TS-06 | TS-07 | TS-08 | TS-09 |
| Ονομαστική Παραμόρφωση (%) | 29    | 24    | 19    | 12    | 10     | 7     | 3     | 2     | 0     |
| Πάχος (μm)                 | 511   | 540   | 560   | 600   | 620    | 640   | 660   | 670   | 680   |
| Σειρά 2 - RX               |       |       |       |       |        |       |       |       |       |
| Δοκίμιο                    | RX-01 | RX-02 | RX-03 | RX-04 | RX-05  | RX-06 | RX-07 |       |       |
| Μέγεθος Κόκκου (μm)        | 148   | 119   | 82    | 67    | 54     | 31    | 27    |       |       |
| Πάχος (μm)                 | 511   | 501   | 488   | 475   | 451    | 400   | 343   |       |       |
| Σειρά 3 - GG               |       |       |       |       |        |       |       |       |       |
| Δοκίμιο                    | GG-01 | GG-02 | GG-03 | GG-04 | GG-05  | GG-06 |       |       |       |
| Μέγεθος Κόκκου (μm)        | 11    | 17    | 57    | 62    | 66     | 27    |       |       |       |
| Πάχος (μm)                 | 540   | 540   | 540   | 540   | 540    | 540   |       |       |       |
| Ανόπτηση (°C/h)            | 600/2 | 680/2 | 850/4 | 850/8 | 850/12 | 680/2 |       |       |       |

Πίνακας 2 – Χαρακτηριστικά των δοκιμών που εξετάστηκαν στο πείραμα. [21]

Τα δοκίμια είναι κατασκευασμένα από ένα εμπορικό πυριτιούχο κράμα σιδήρου με χαμηλή περιεκτικότητα άνθρακα γνωστό ως Non-Oriented Electrical Steel (NOES). Το κράμα αυτό έχει ιδιαίτερα θεμιτές ιδιότητες παρόμοιες με αυτές του καθαρού σιδήρου, υψηλή μαγνητική διαπερατότητα, μαγνητική επαγωγή και χαμηλό συνεκτικό πεδίο. Οι πυριτιούχοι χάλυβες εμφανίζουν μικρότερες απώλειες εξαιτίας δινορευμάτων, η παραγωγική του διαδικασία όμως απαιτεί την περιεκτικότητα σε ποσοστά μικρότερα του 3.5% για την παραγωγή λεπτών ελασμάτων πάχους μικρότερου των 0.3 mm. [22]





Εικόνα 17 – Φωτογραφία της σειράς δοκιμών που RX και GG κατά τη διεξαγωγή του πειράματος.



Εικόνα 18 – Φωτογραφία της σειράς δοκιμών που TS κατά τη διεξαγωγή του πειράματος.

Η σειρά TS (True-Strain) αποτελείται από ελάσματα ηλεκτρικού χάλυβα ψυχρής έλασης του οποίου η παραμόρφωση σε μορφή ποσοστού επί του αρχικού πάχους του ελάσματος φαίνεται στον πίνακα.

Η σειρά RX αποτελείται από δοκίμια που έχουν υποβληθεί σε ανόπτηση ώστε να ανακρυσταλλωθούν. Η ανόπτηση τους έγινε σε θερμοκρασία 760 °C για διάρκεια 2 ωρών. Οι διαφορές του αναγράφονται στον παραπάνω πίνακα και αφορούν το μέγεθος κόκκου του κράματος και το πάχος του δοκιμίου.



Η σειρά GG αποτελείται από δοκίμια που έχουν υποστεί ανόπτηση σε διαφορετικές θερμοκρασίες και για διαφορετικές χρονικές διάρκειες, τα αποτελέσματα της οποίας είναι το μέγεθος κόκκων τους.

#### 2.4. Πειραματική Διαδικασία

Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός που αναφέρθηκε παραπάνω. Η διαδικασία του όμως επηρέασε εξίσου σημαντικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Μετά από την αρχική σύνδεση του αισθητήρα με τον εργαστηριακό εξοπλισμό έγινε η ρύθμιση του εξοπλισμού στις επιθυμητές κάθε φορά συχνότητες. Ο αισθητήρας τοποθετούνταν σε δύο διαφορετικά σημεία σε κάθε δοκίμιο. Λόγω συμμετρίας των ιδιοτήτων των δοκιμίων λήφθηκαν μετρήσεις στο κέντρο και στο αριστερό άκρο κάθε δοκιμίου. Θεωρείται ότι οι μετρήσεις στο αριστερό άκρο είναι όμοιες στη συμπεριφορά και στις τιμές τους με αυτές στο δεξί. Η τοποθέτηση του αισθητήρα έγινε με απλή εναπόθεση του πάνω στα δοκίμια, χωρίς εξωτερική δύναμη πέρα από τη βαρύτητα και την ελκτική δύναμη του ίδιου του αισθητήρα και του δοκιμίου εξαιτίας των μαγνητικών δυνάμεων. Αποδείχθηκε ότι παράγοντες όπως μη ισχυρά μαγνητικά πεδία από μικρές ηλεκτρονικές συσκευές σε απόσταση μεγαλύτερη των 15 εκατοστών ή η παρουσία των μεταλλικών ποδιών του πάγκου εργασίας κάτω από την περιοχή της μέτρησης δεν επηρέασαν ορατά την πειραματική διαδικασία, και κατά προέκταση ενώ δόθηκε προσοχή στην πιθανή παρεμβολή τους, δεν κρίθηκε απαραίτητη η τήρηση κάποιου αυστηρού πρωτοκόλλου.

Η παλμογεννήτρια χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ημιτονοειδούς σήματος συχνοτήτων 0.1, 0.2, 0.5 και 0.1 Hertz και συνδέθηκε με τον ενισχυτή σήματος για την παραγωγή σήματος το οποίο στην είσοδο της διάταξης έπαιρνε τιμές  $V_{in} = 95.75 \text{ mV}, 170 \text{ mV}, 770 \text{ mV}, 770 \text{ V}, 1.737 \text{ V}, 2 \text{ V}, 3 \text{ V}, 3.5 \text{ V}, 4 \text{ V}$  και  $4.5 \text{ V}$ . Σκοπός ήταν η χρήση όλων των δυνατοτήτων του ενισχυτή, όμως η διάταξη στις υψηλές τάσεις θερμαινόταν σημαντικά καθιστώντας ιδιαίτερα δύσκολες τις μετρήσεις, απαιτώντας σημαντικά χρονικά διαστήματα ανάμεσα σε διαδοχικές μετρήσεις. Σε αυτό το σημείο κρίθηκε σκόπιμο να μην χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερες τιμές

ρεύματος καθώς η θερμοκρασία των πηνίων θα αλλοίωνε με τρόπο μη επαναλήψιμο τις μετρήσεις. Η μεγαλύτερη θερμική καταπόνηση υπέστη από το πηνίο εισόδου καθώς στην τιμή των 4.5 V το διέρρηε ρεύμα έντασης μεγαλύτερης των 4 Ampere.

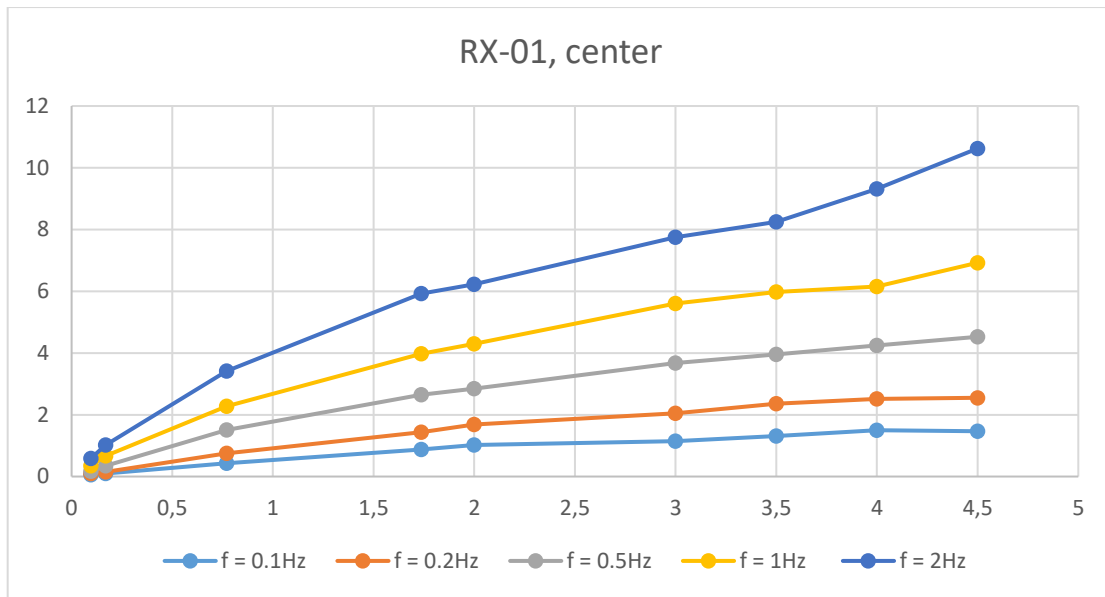
Παρατηρήθηκε ότι στις χαμηλές τάσεις οι μετρήσεις χαρακτηρίζονται από σημαντικό θόρυβο, η αντιμετώπιση του οποίου έγινε με λήψη του μέσου όρου, ανάμεσα σε πολλούς κύκλους μετρήσεων. Σε υψηλότερες τιμές τάσης παρατηρήθηκαν περιστασιακά outliers οπότε χρησιμοποιήθηκαν πάλι πολλαπλές μετρήσεις για την αναίρεση τους.

Τέλος, οι συχνότητες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αρκετά μικρές ούτως ώστε, όπως αναφέρθηκε και στο θεωρητικό σκέλος της εργασίας, να αποφευχθεί η δημιουργία δινορευμάτων με σκοπό τη διερεύνηση των εγγενών ιδιοτήτων των υλικών με βάση την κατεργασία εκάστου δοκιμίου.

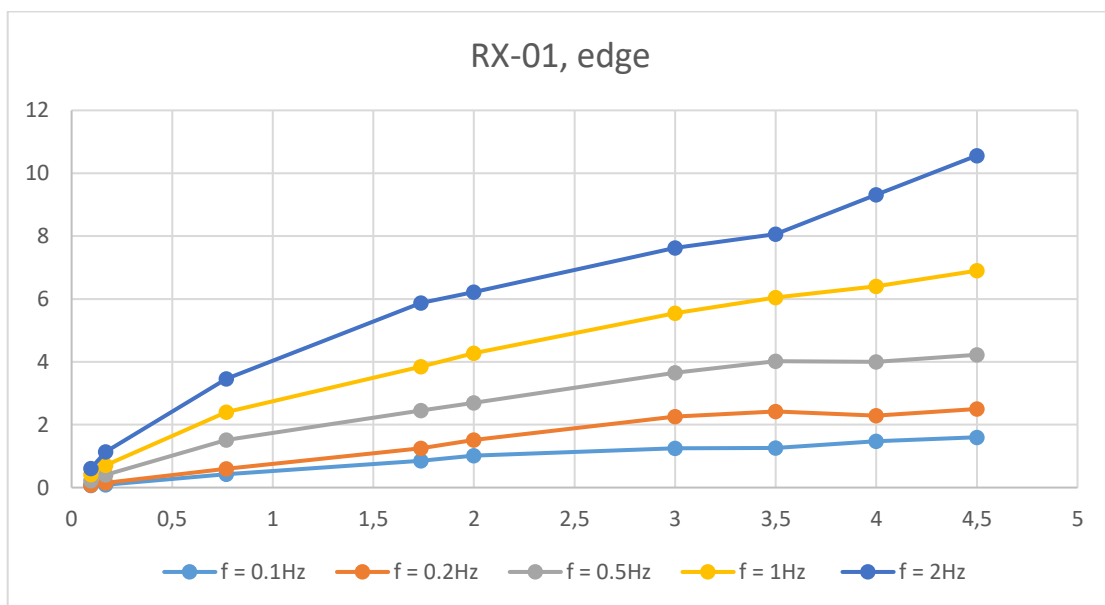
## 2.5. Παρουσίαση μετρήσεων

### 2.5.1. Διαγράμματα Τάσης Εισόδου – Τάσης Εξόδου ανά Δοκίμιο

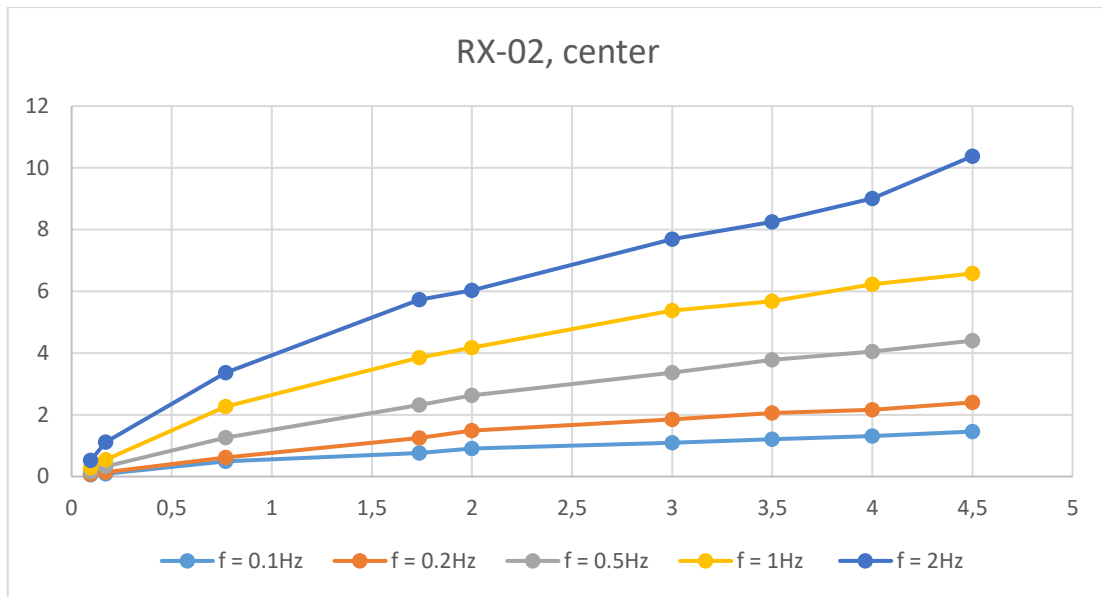
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται διαγραμματικά τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας. Στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται η τιμή της τάσης εισόδου και στον κάθετο αυτή της τάσης εξόδου. Παρατηρείται ότι η αύξηση της συχνότητας αυξάνει δραστικά την τιμή της τάσης εξόδου. Η διακύμανση του λόγου  $V_{out}/V_{in}$  συνδέεται άρρηκτα με τη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού. Η κύρια πληροφορία που υποδεικνύουν τα ακόλουθα διαγράμματα είναι οι πρότυπες τιμές ανίχνευσης για τα υπό εξέταση υλικά και εν συνεχεία, η χρήση αυτής της πληροφορίας για την μοντελοποίηση της συμπεριφοράς τους στα εύρη τάσης για τις εξεταζόμενες συχνότητες.



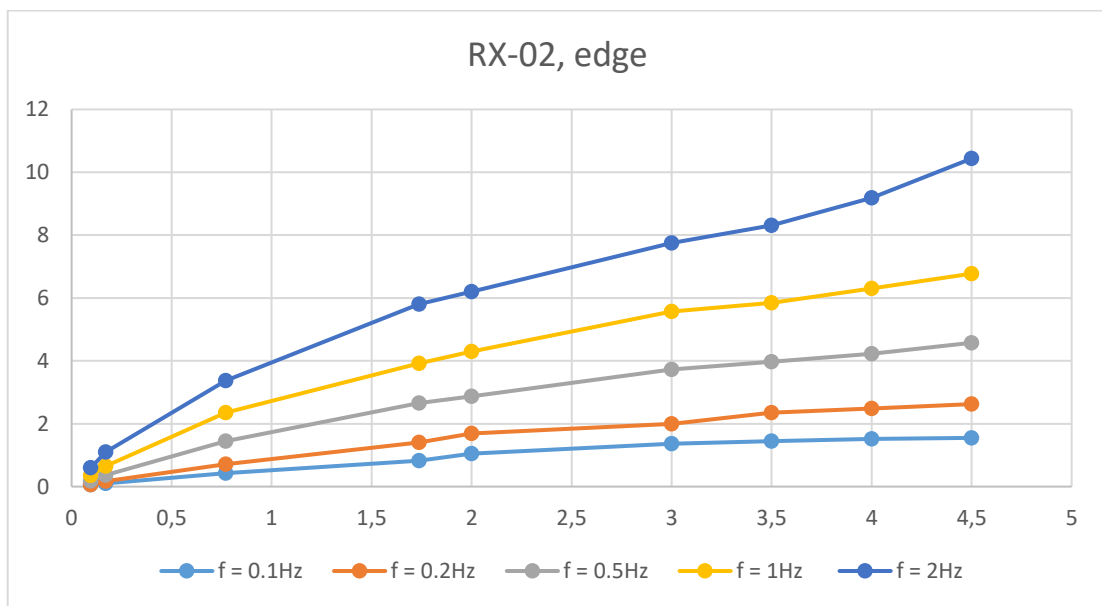
Διάγραμμα 1 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



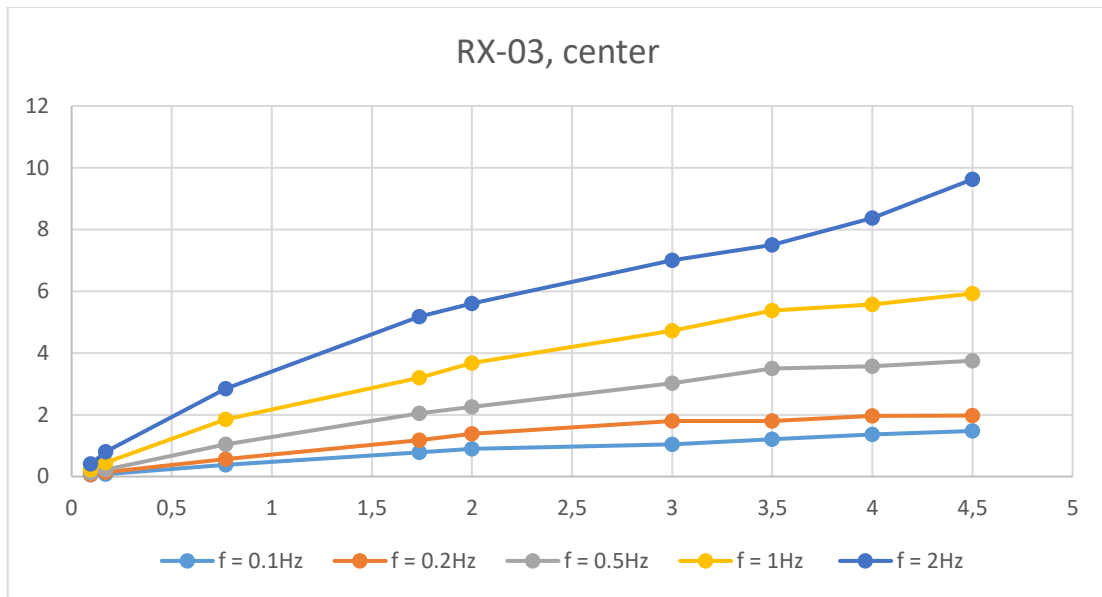
Διάγραμμα 2 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



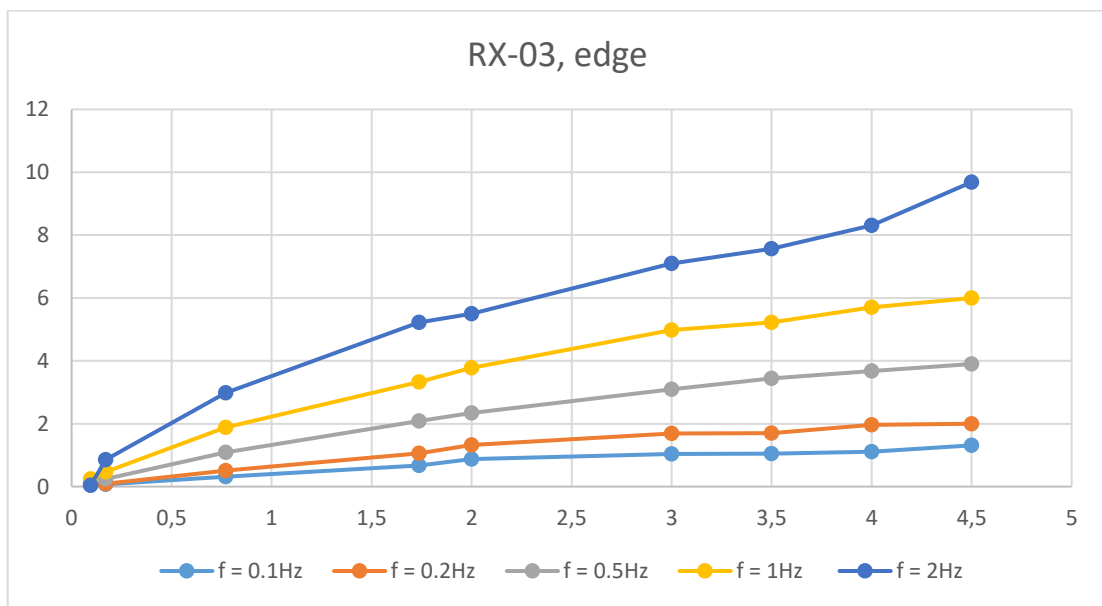
Διάγραμμα 3 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



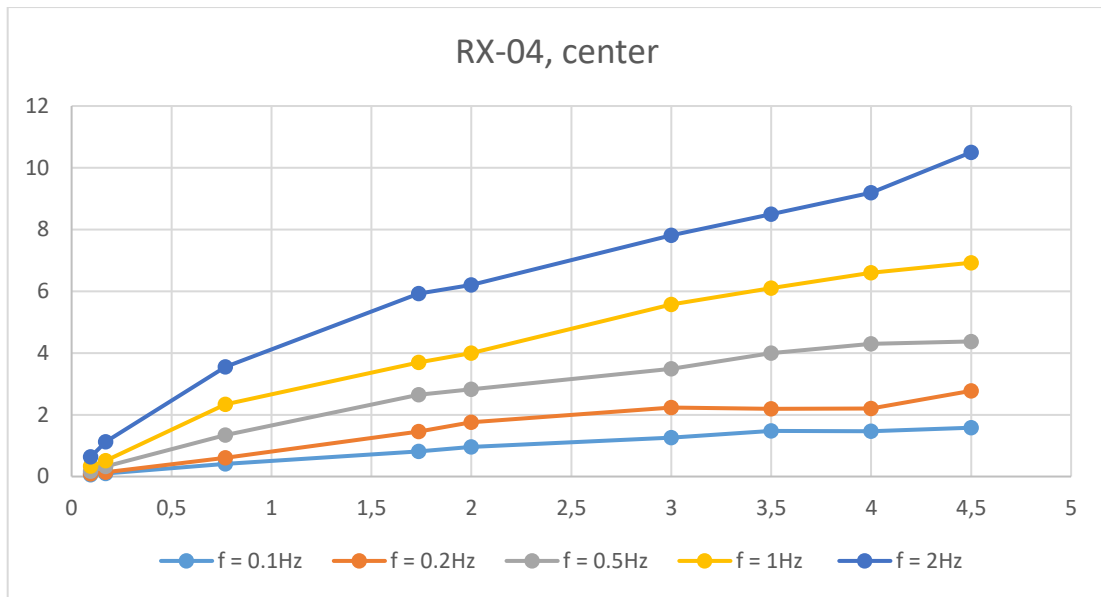
Διάγραμμα 4 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



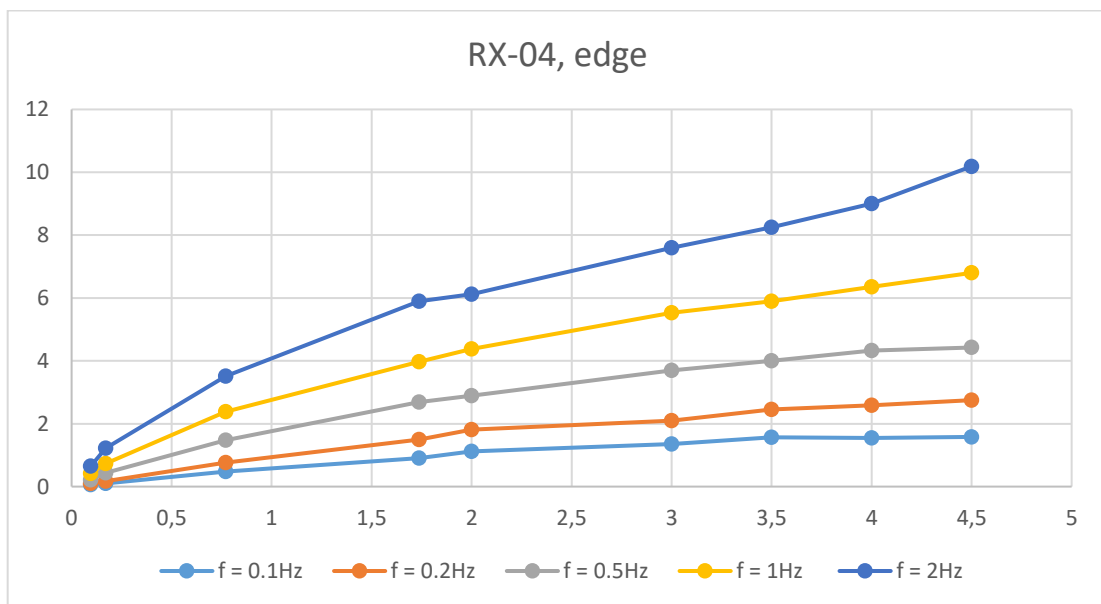
Διάγραμμα 5 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



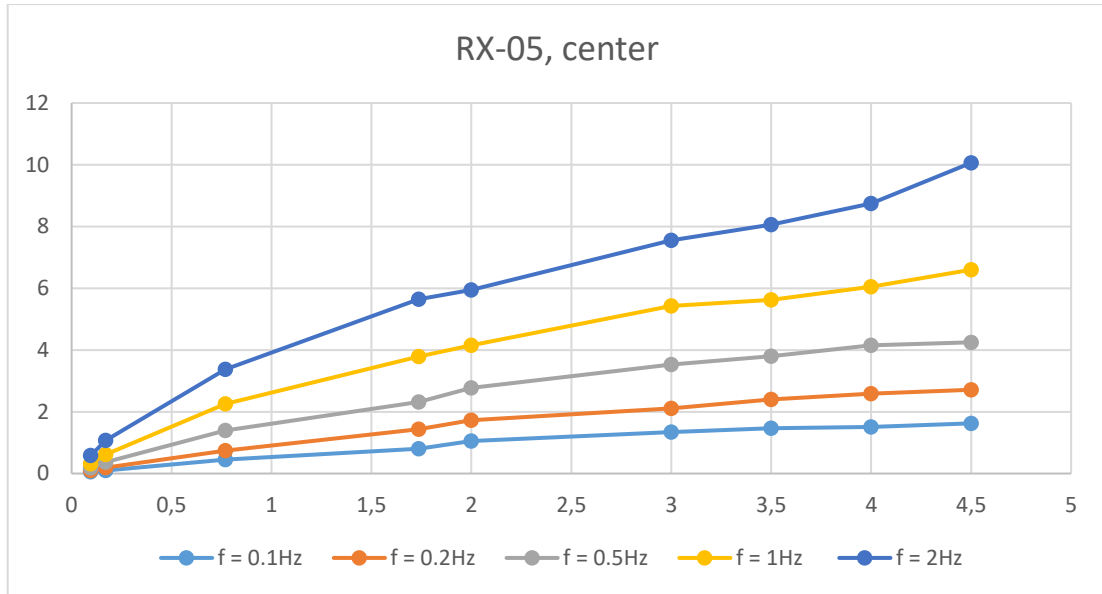
Διάγραμμα 6 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



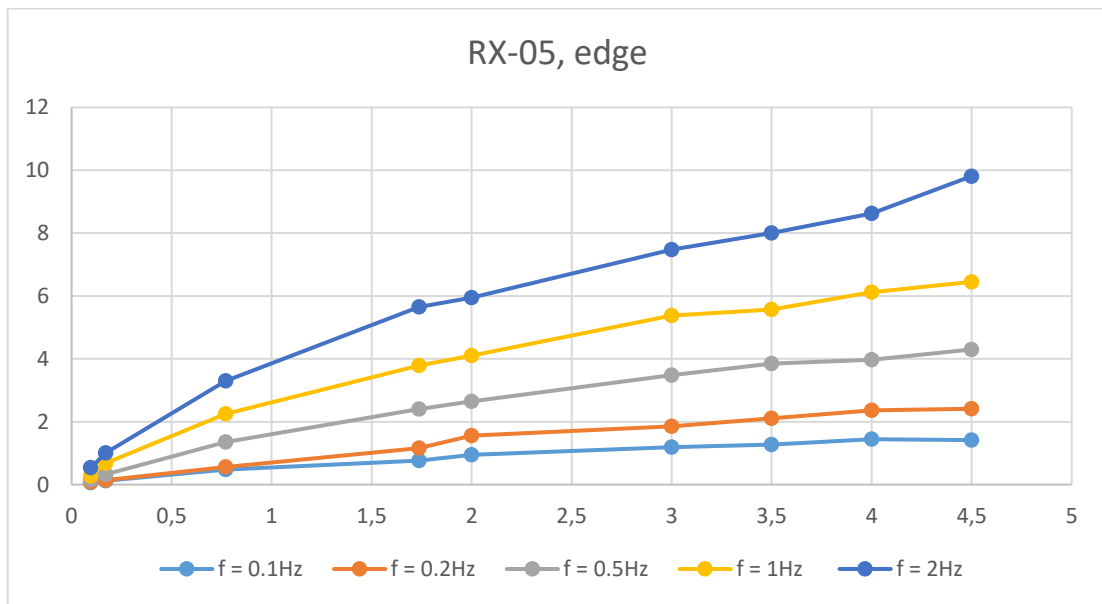
Διάγραμμα 7 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



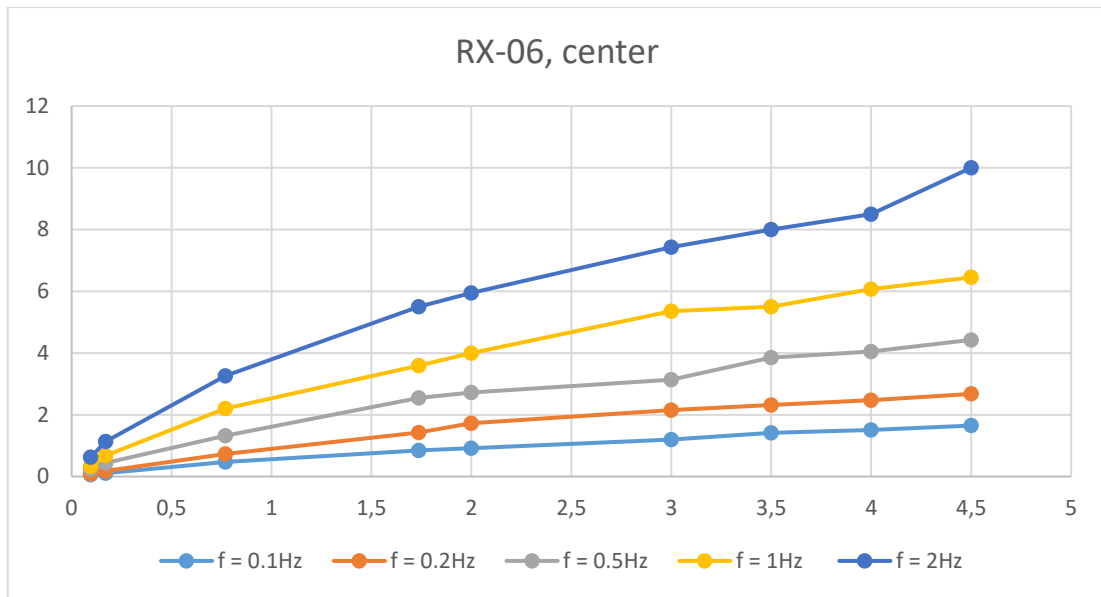
Διάγραμμα 8 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



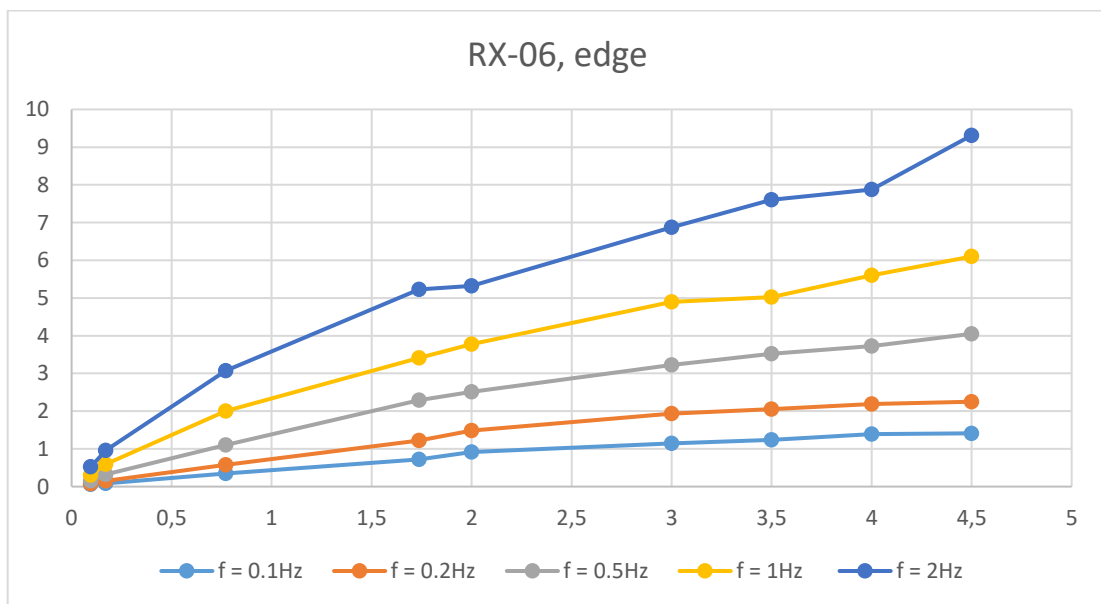
Διάγραμμα 9 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



Διάγραμμα 10 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.

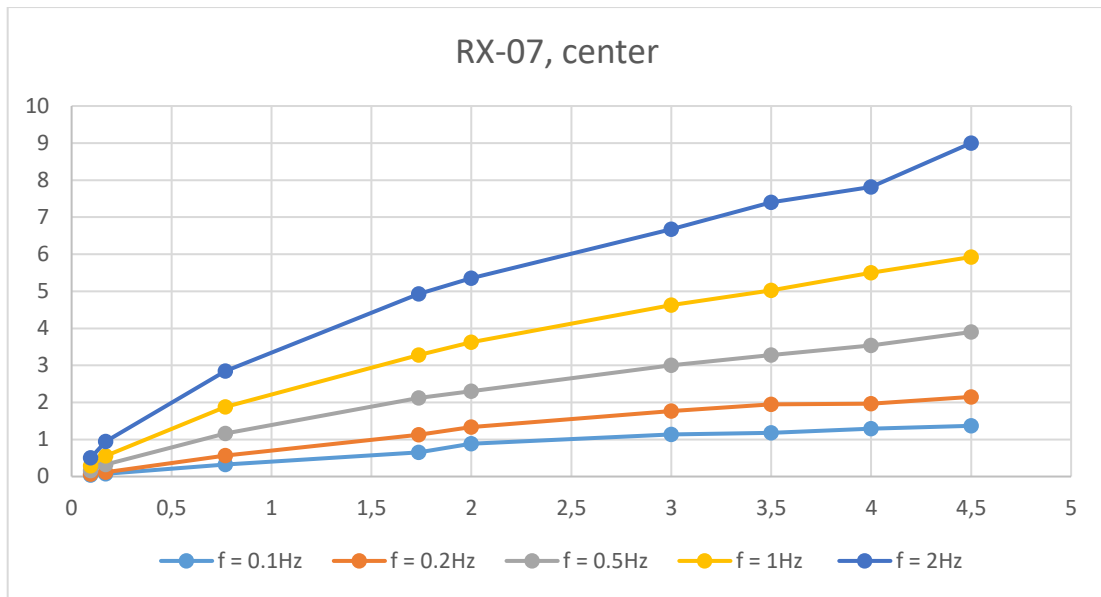


Διάγραμμα 11 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.

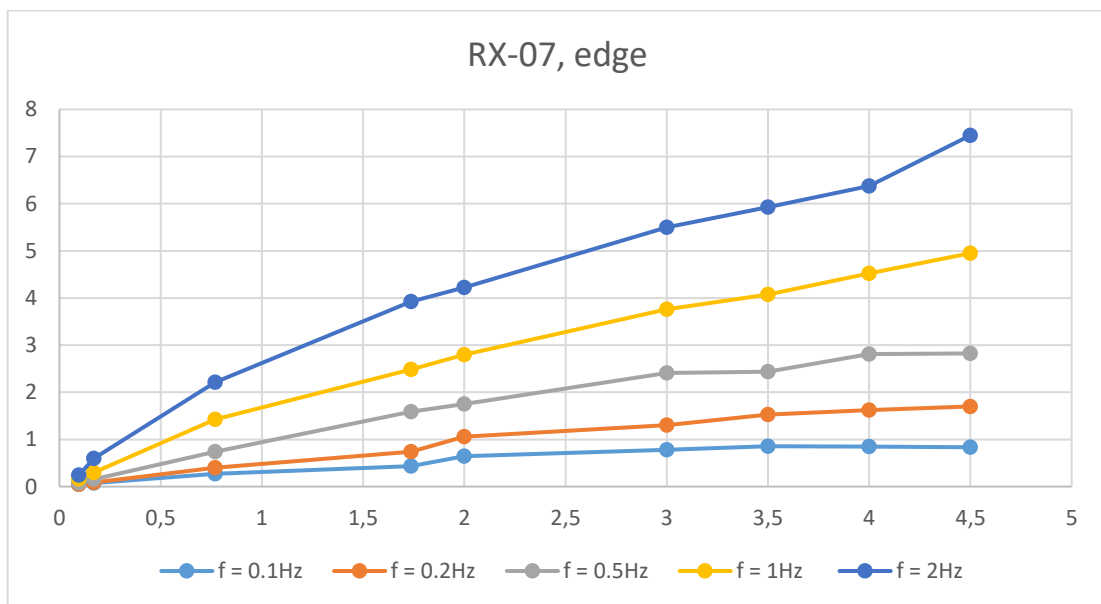


Διάγραμμα 12 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.

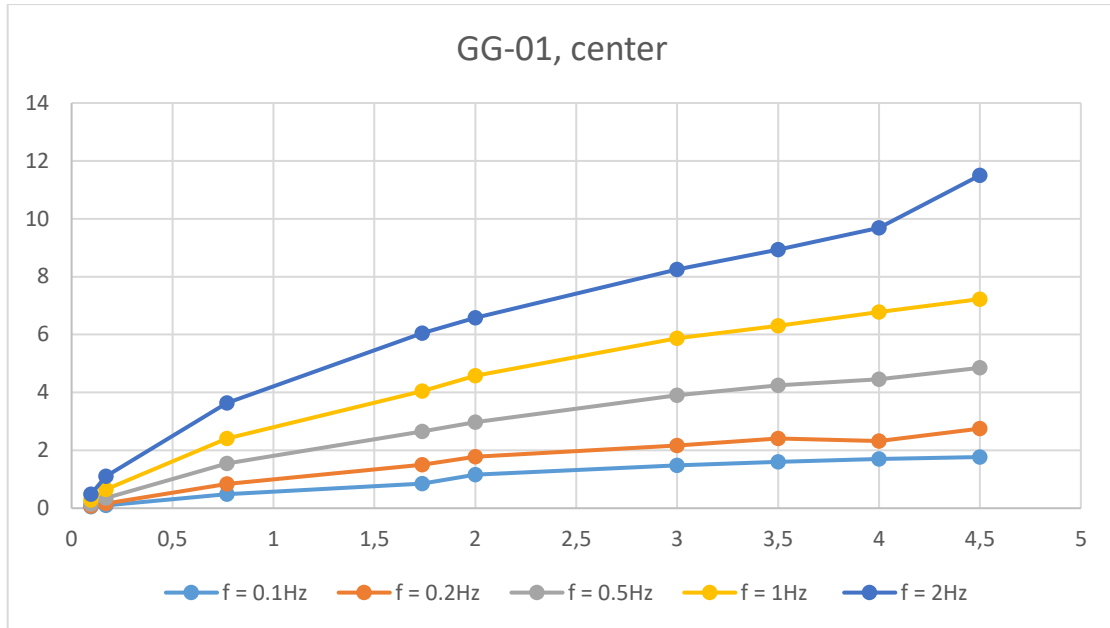




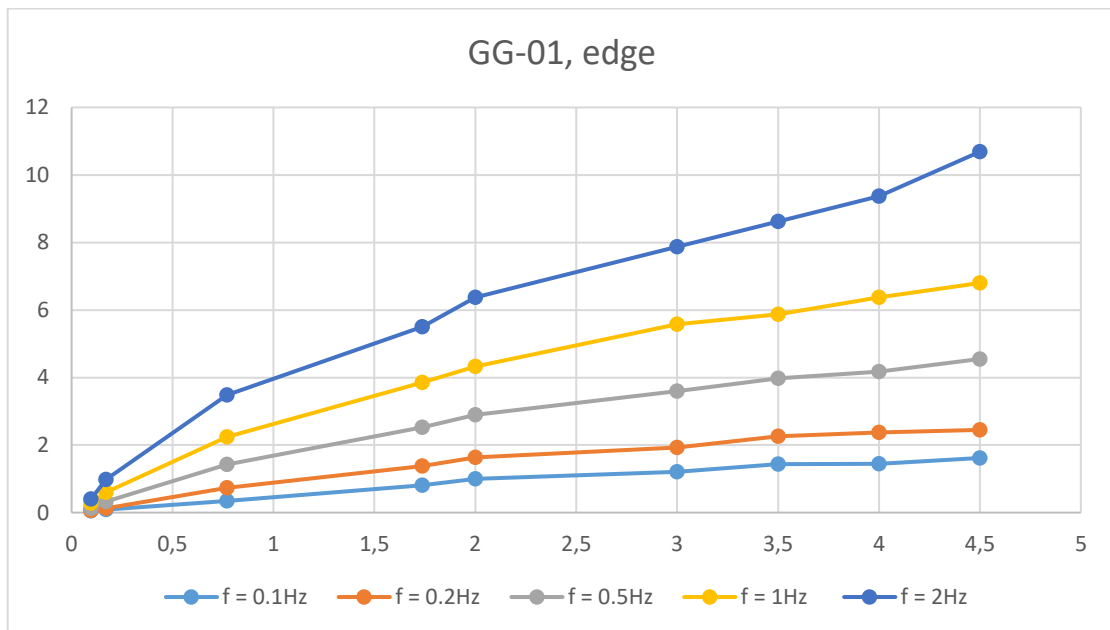
Διάγραμμα 13 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



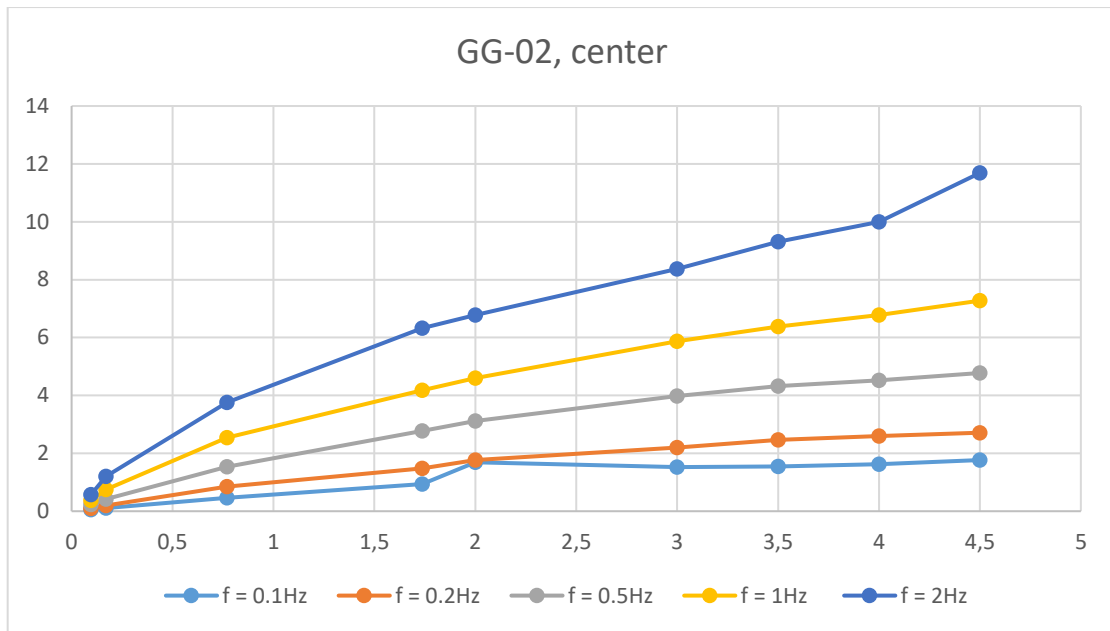
Διάγραμμα 14 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



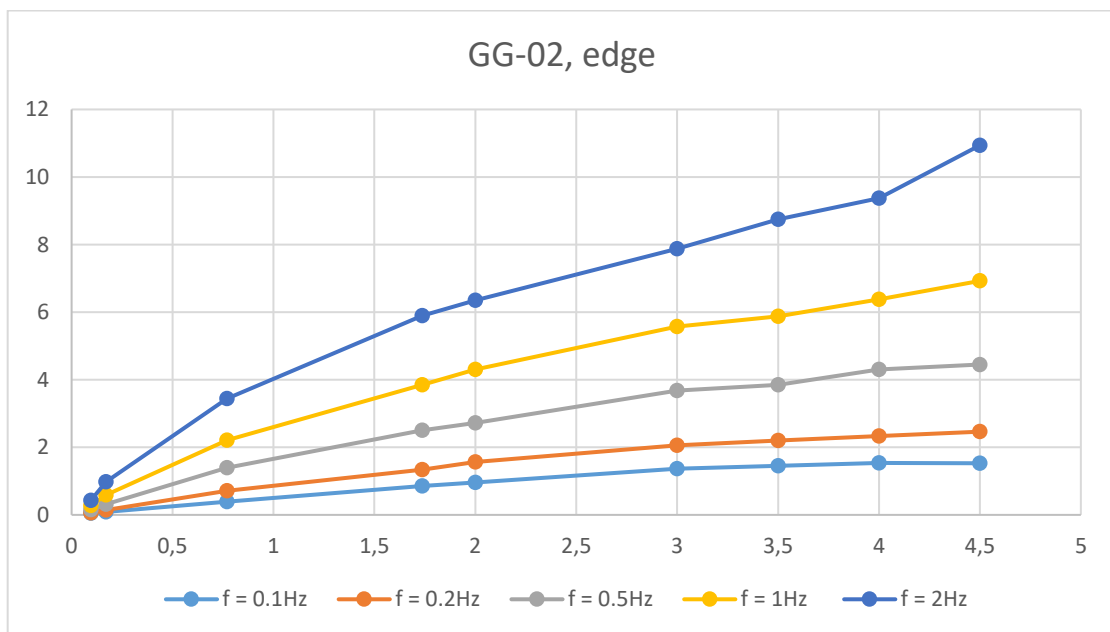
Διάγραμμα 15 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



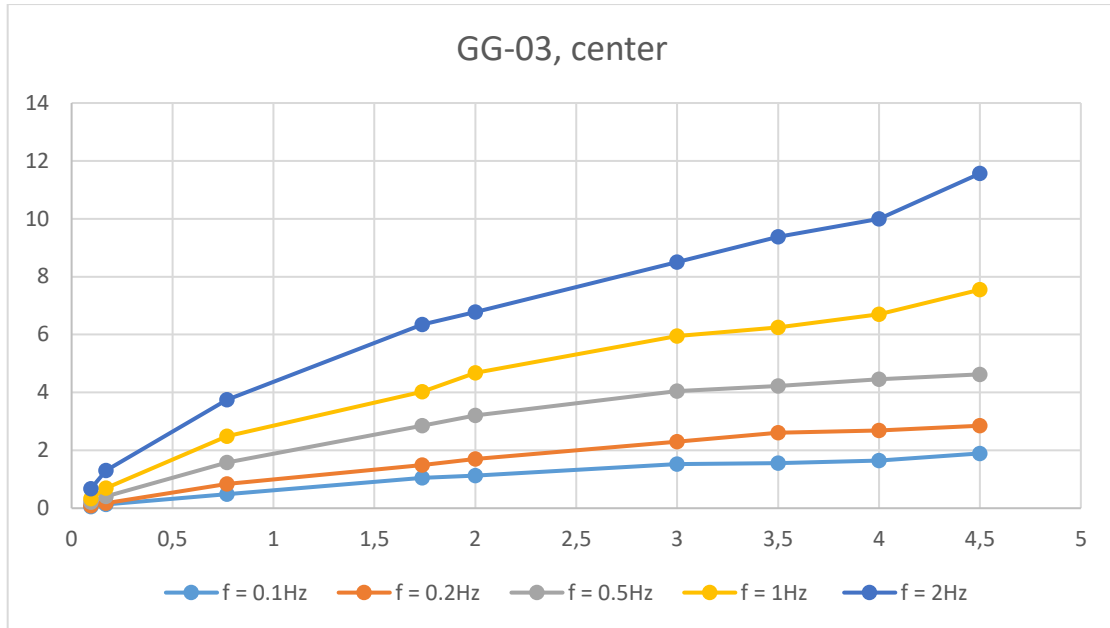
Διάγραμμα 16 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



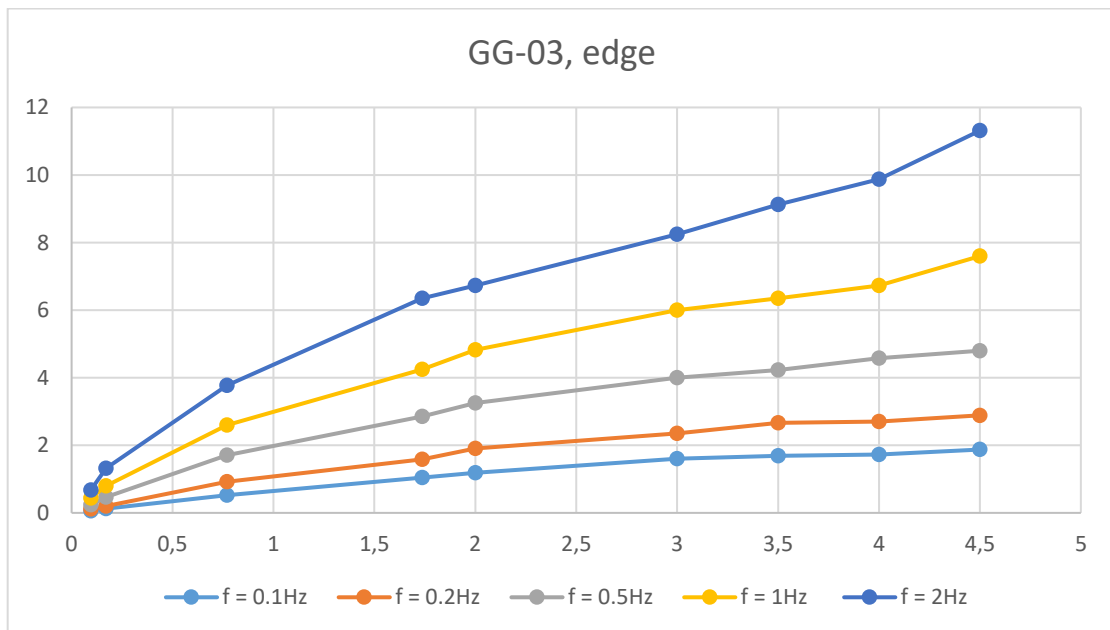
Διάγραμμα 17 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



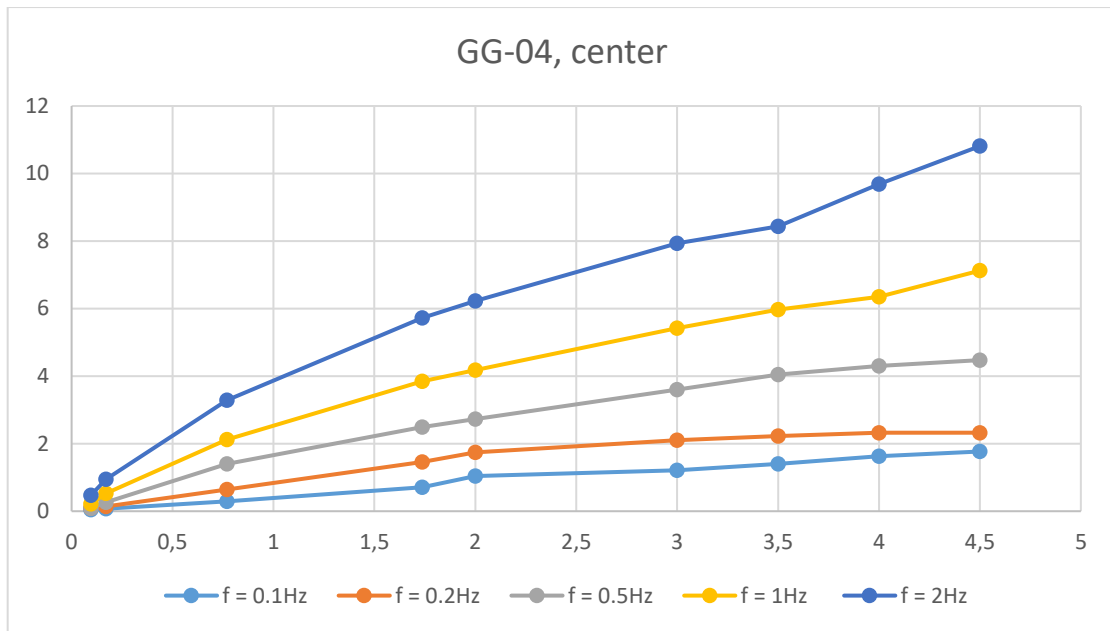
Διάγραμμα 18 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



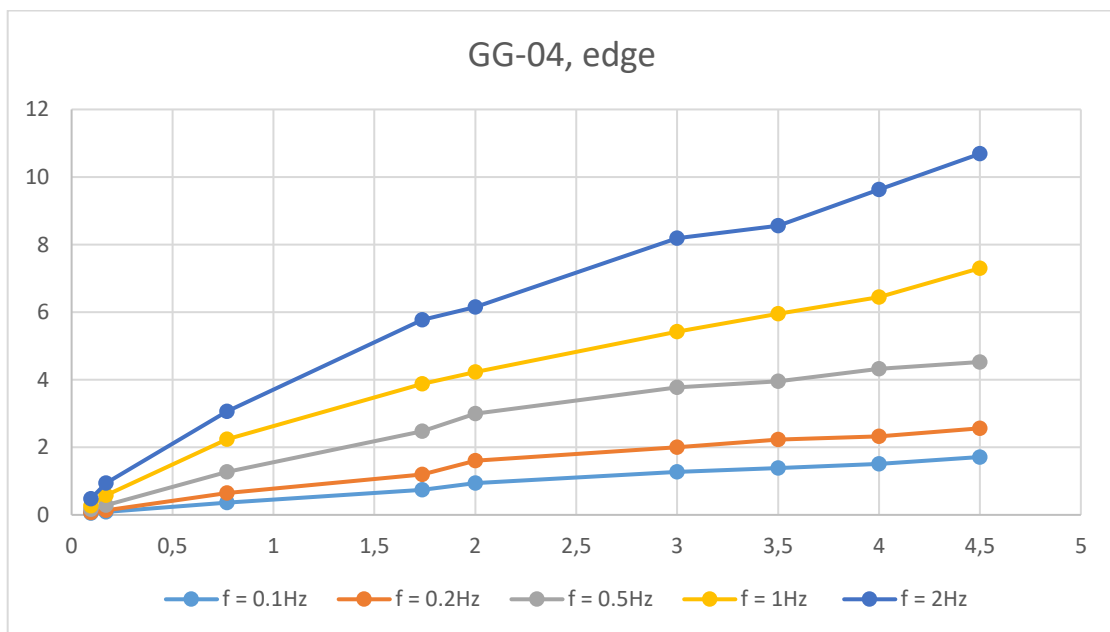
Διάγραμμα 19 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



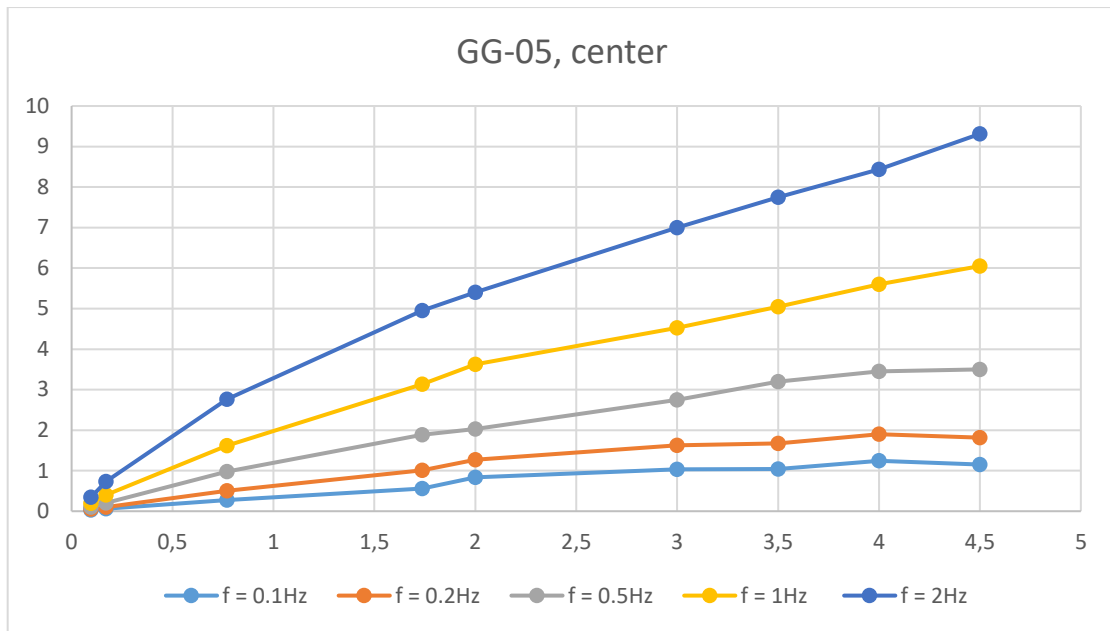
Διάγραμμα 20 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



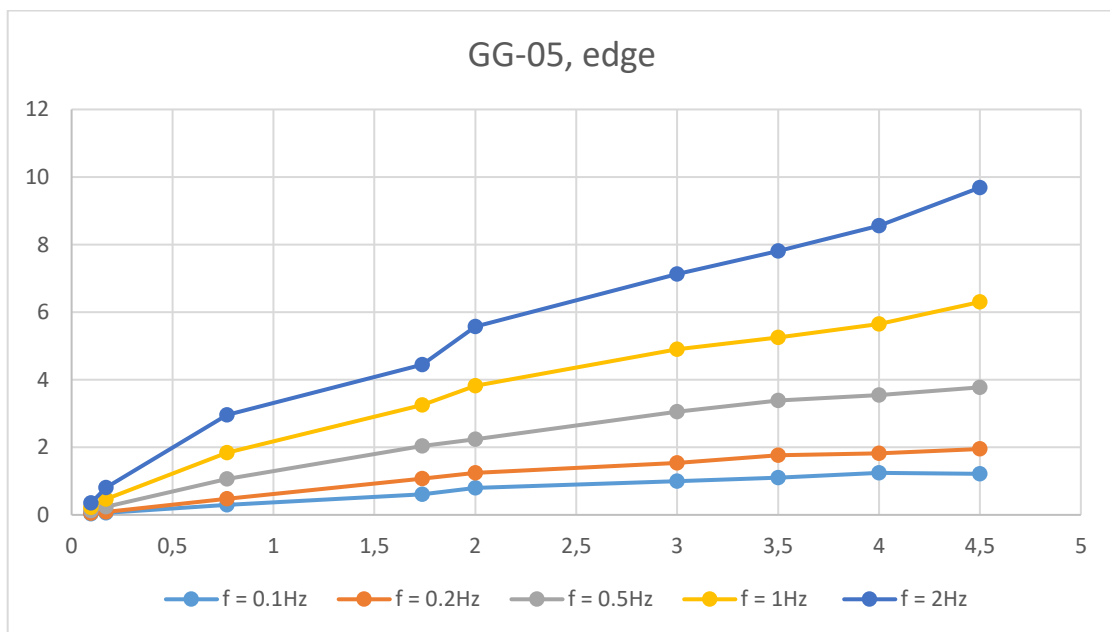
Διάγραμμα 21 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



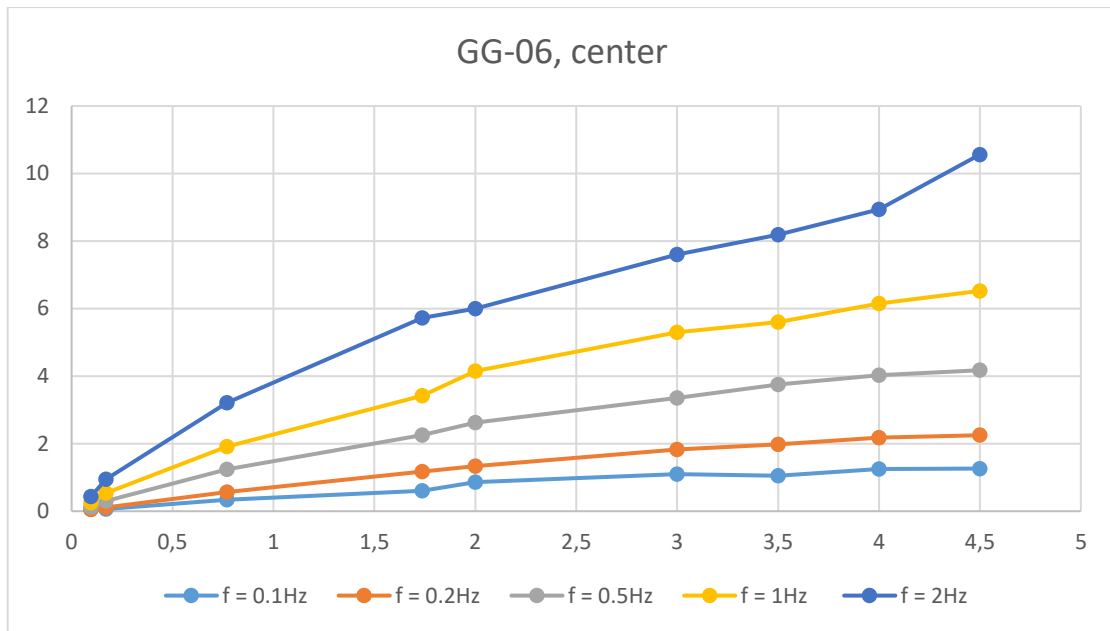
Διάγραμμα 22 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



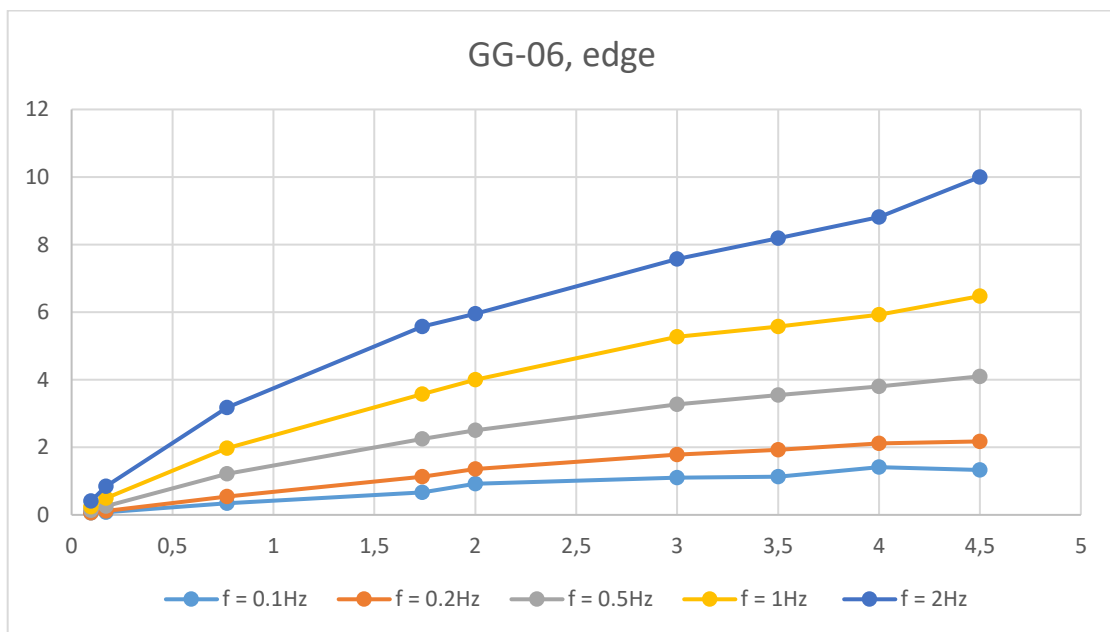
Διάγραμμα 23 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



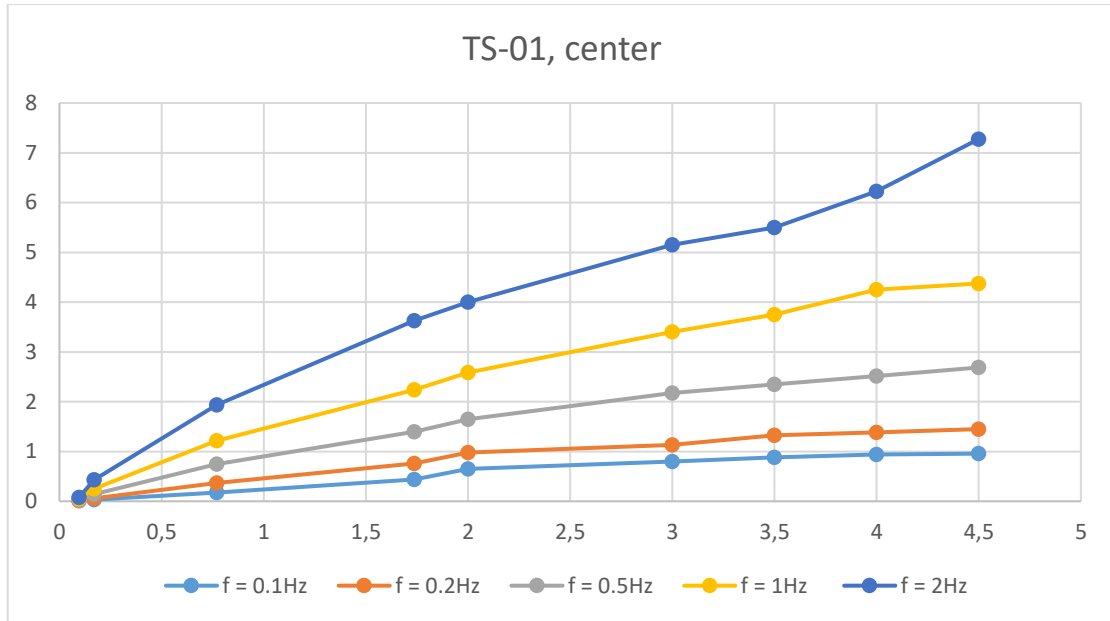
Διάγραμμα 24 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



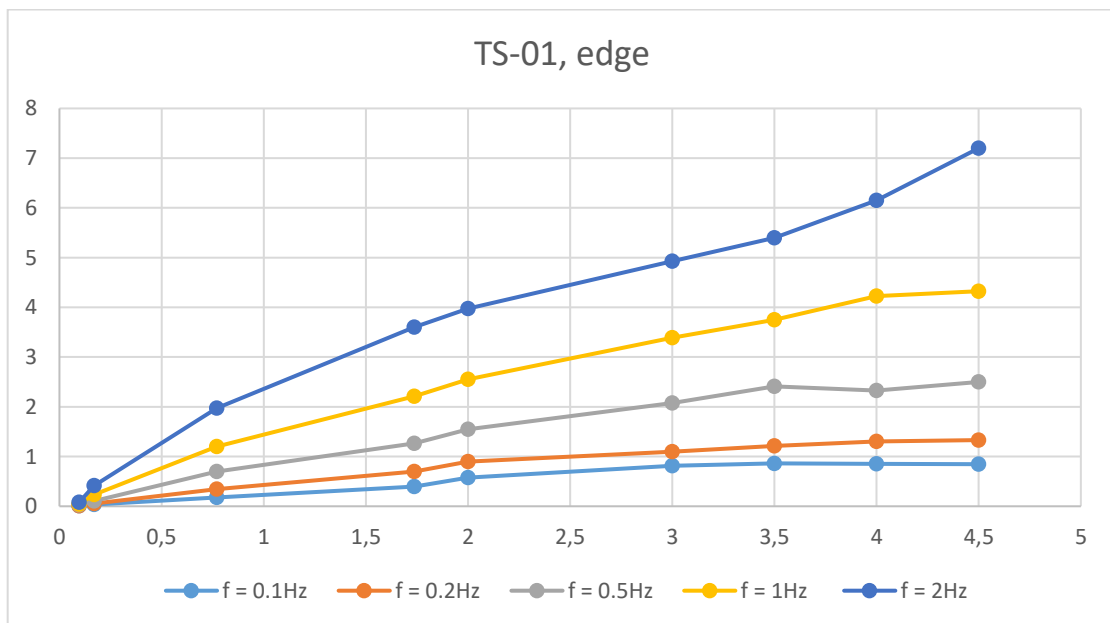
Διάγραμμα 25 – Ο άξονας  $x$  δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας  $y$  δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



Διάγραμμα 26 – Ο άξονας  $x$  δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας  $y$  δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.

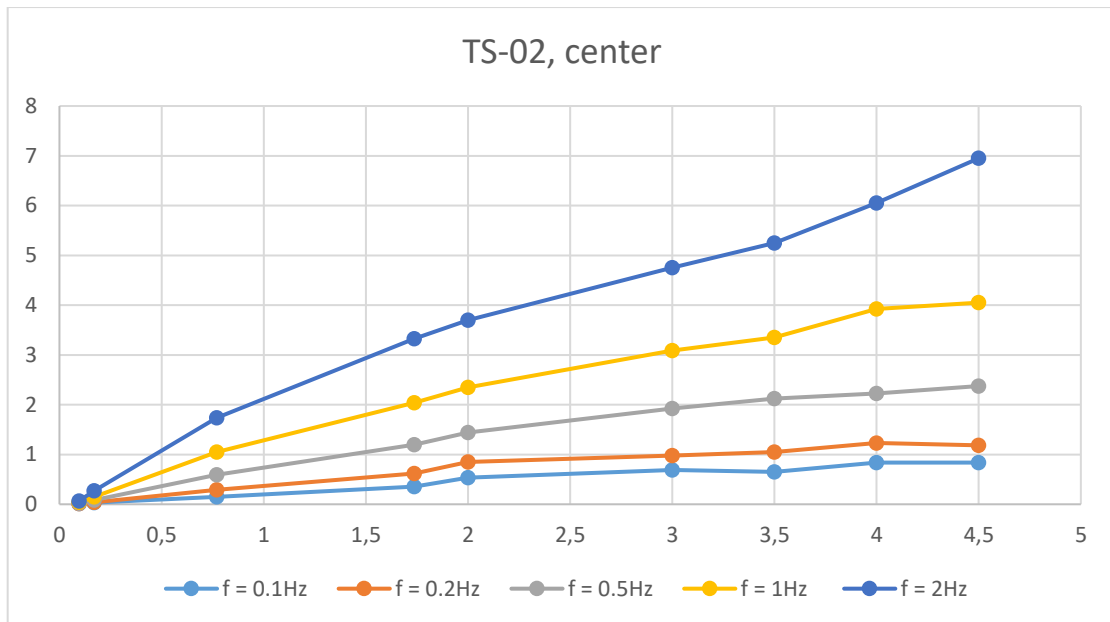


Διάγραμμα 27 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.

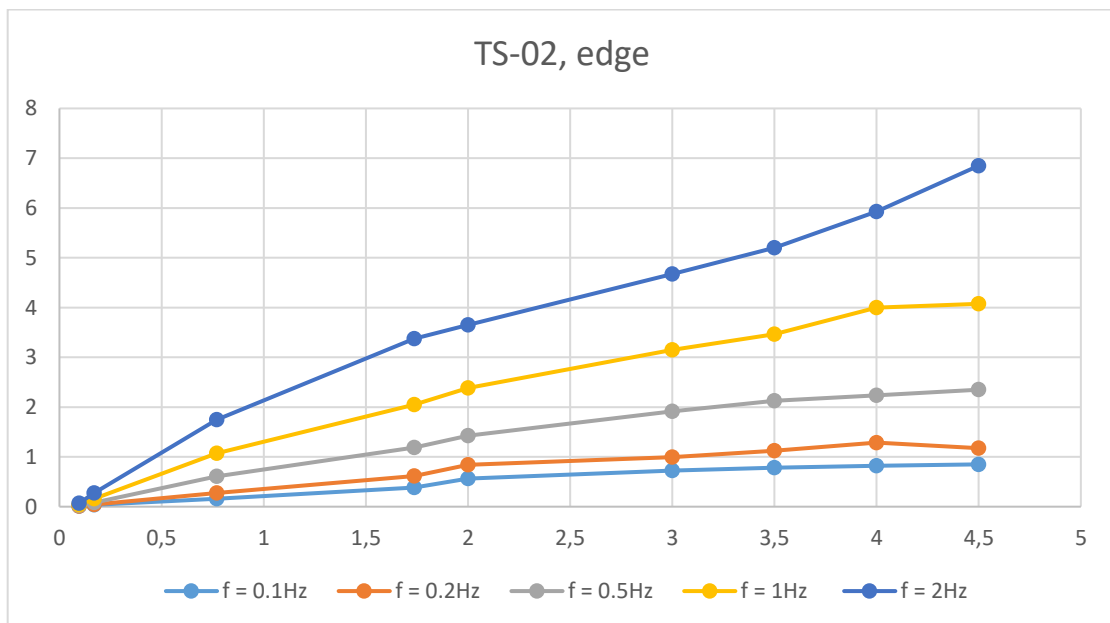


Διάγραμμα 28 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.

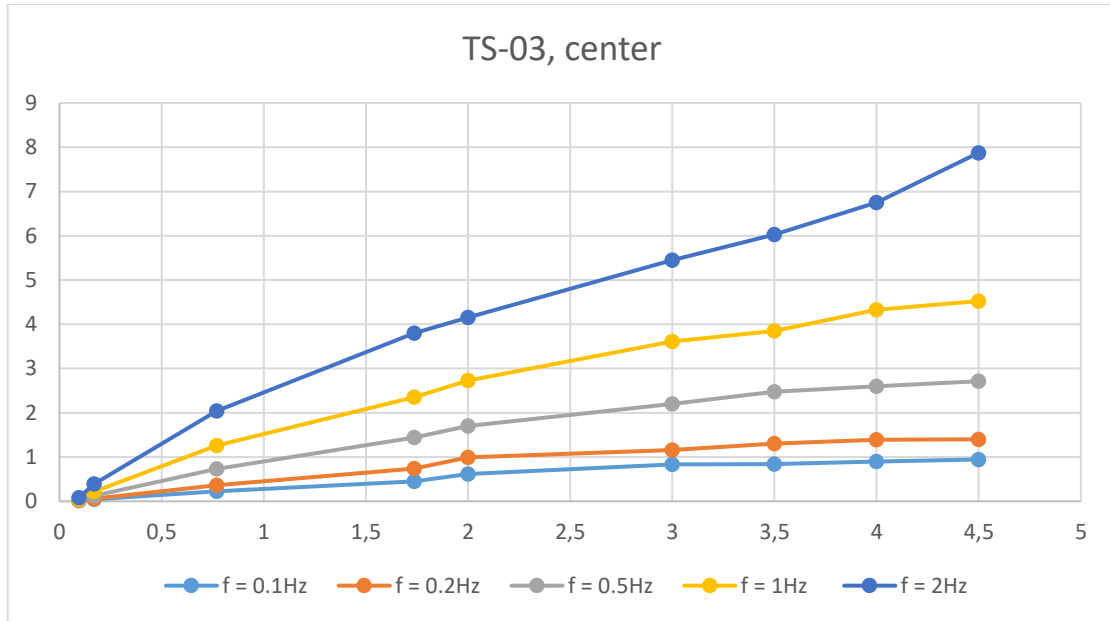




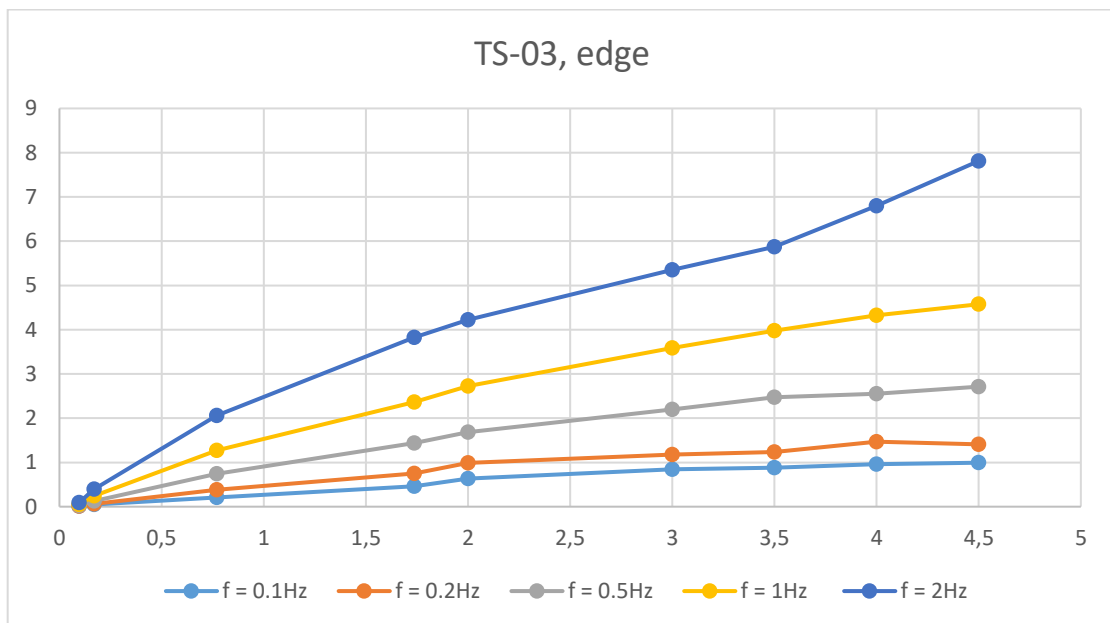
Διάγραμμα 29 – Ο άξονας  $x$  δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας  $y$  δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



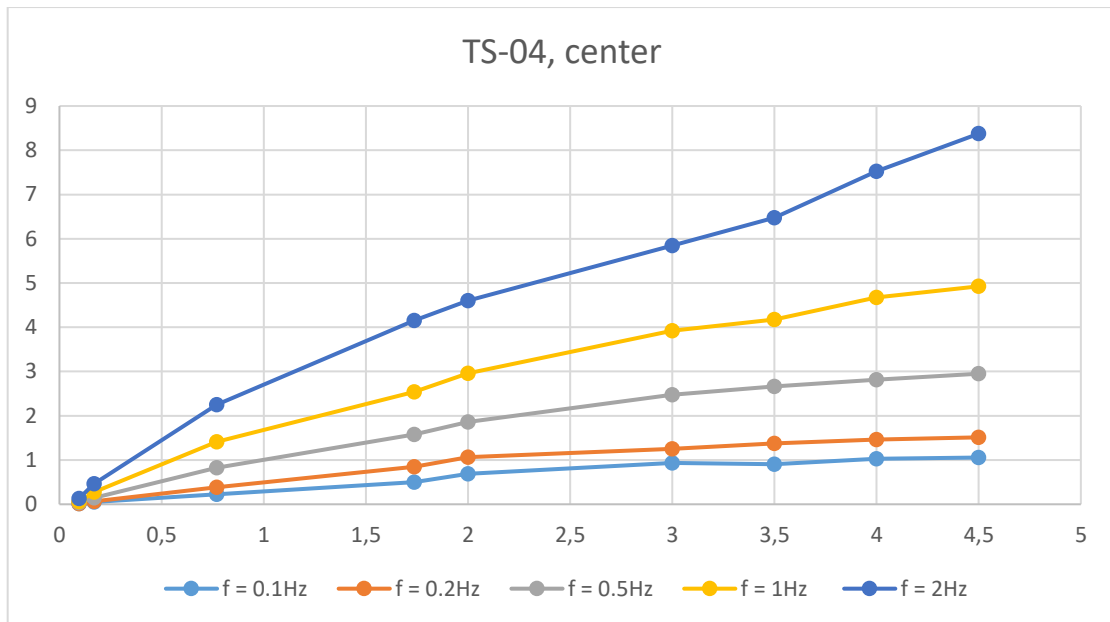
Διάγραμμα 30 – Ο άξονας  $x$  δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας  $y$  δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



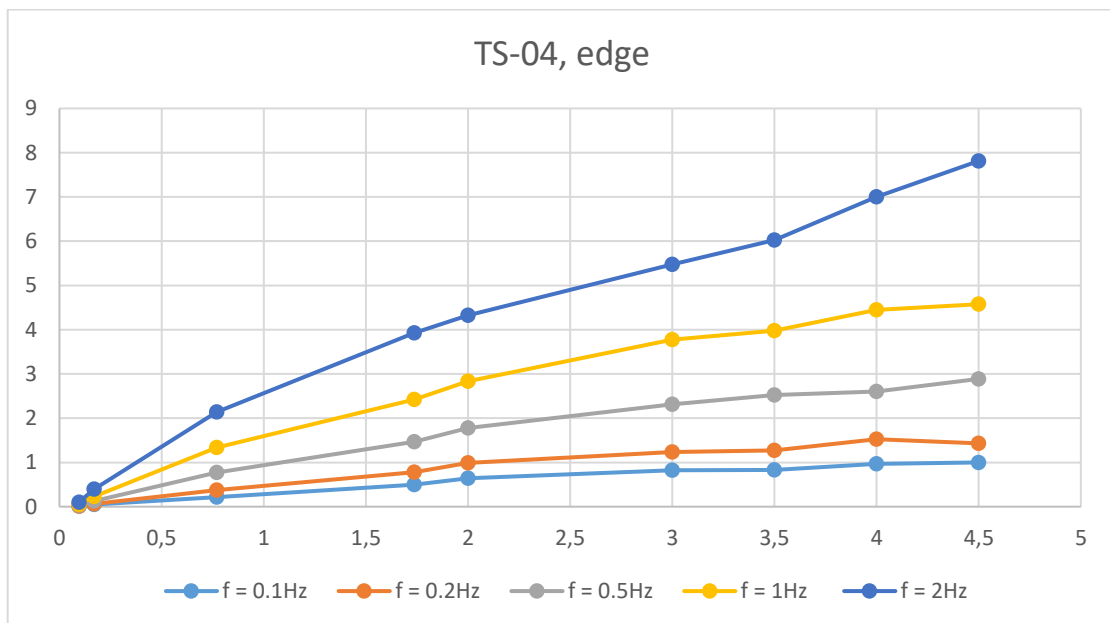
Διάγραμμα 31 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



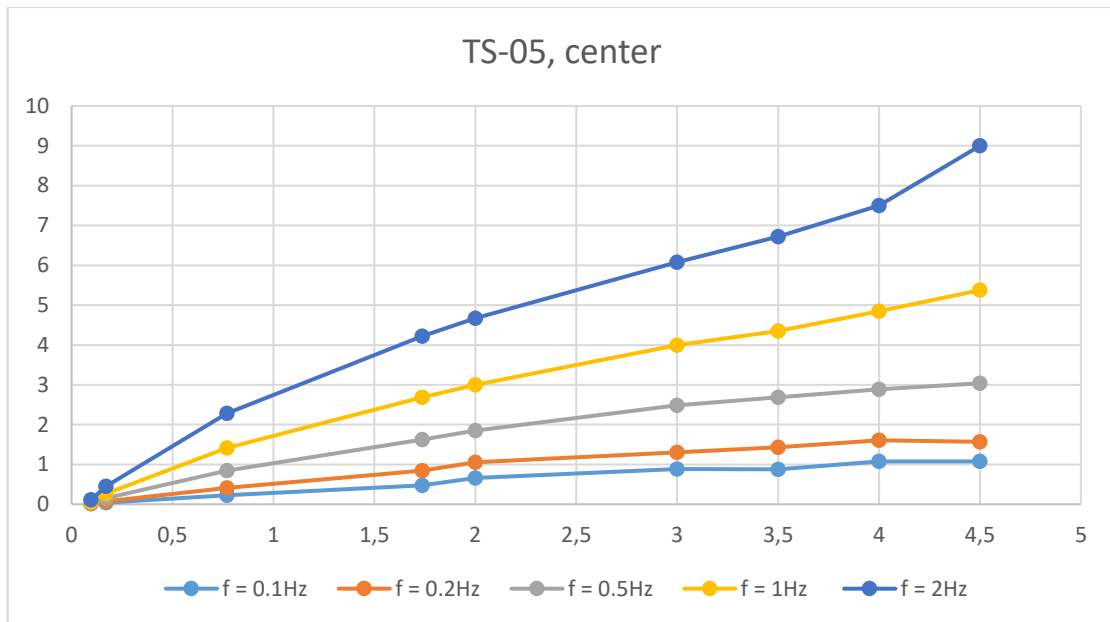
Διάγραμμα 32 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



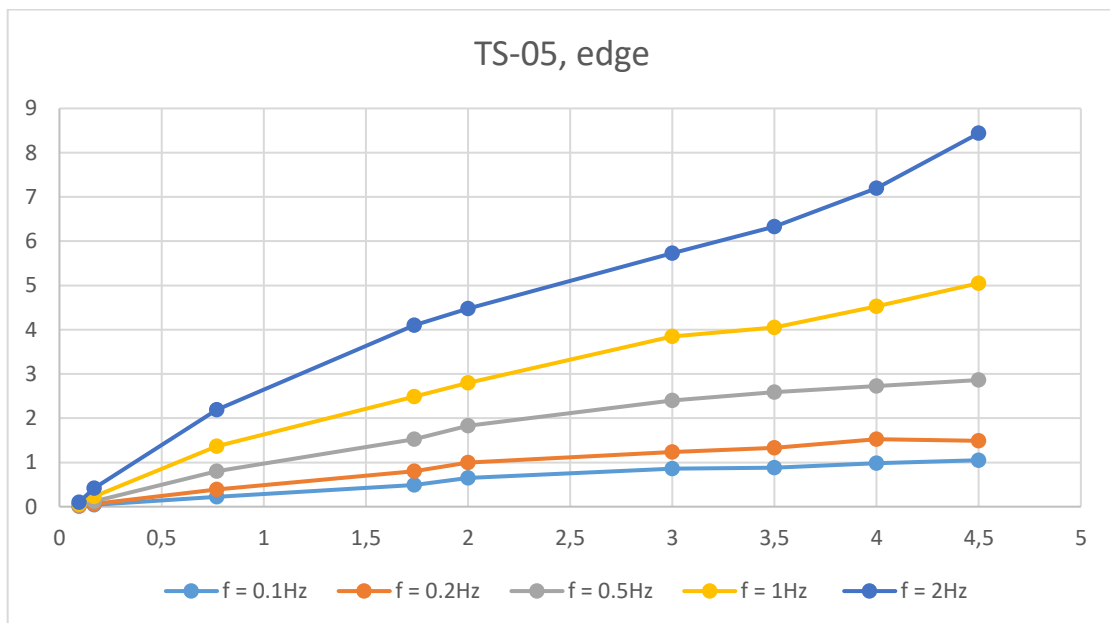
Διάγραμμα 33 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



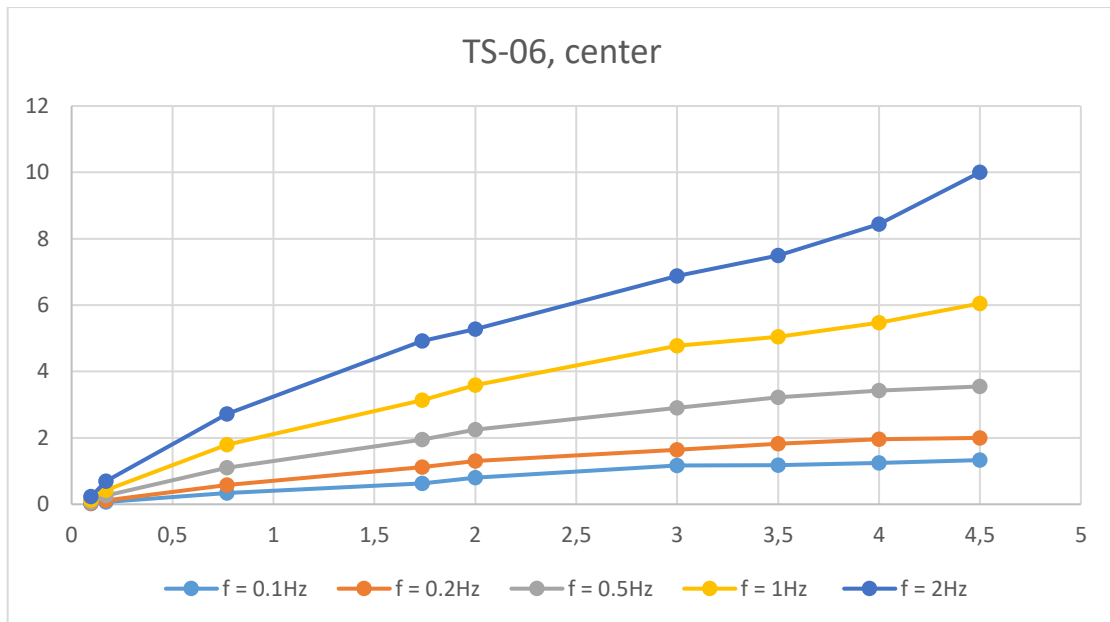
Διάγραμμα 34 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



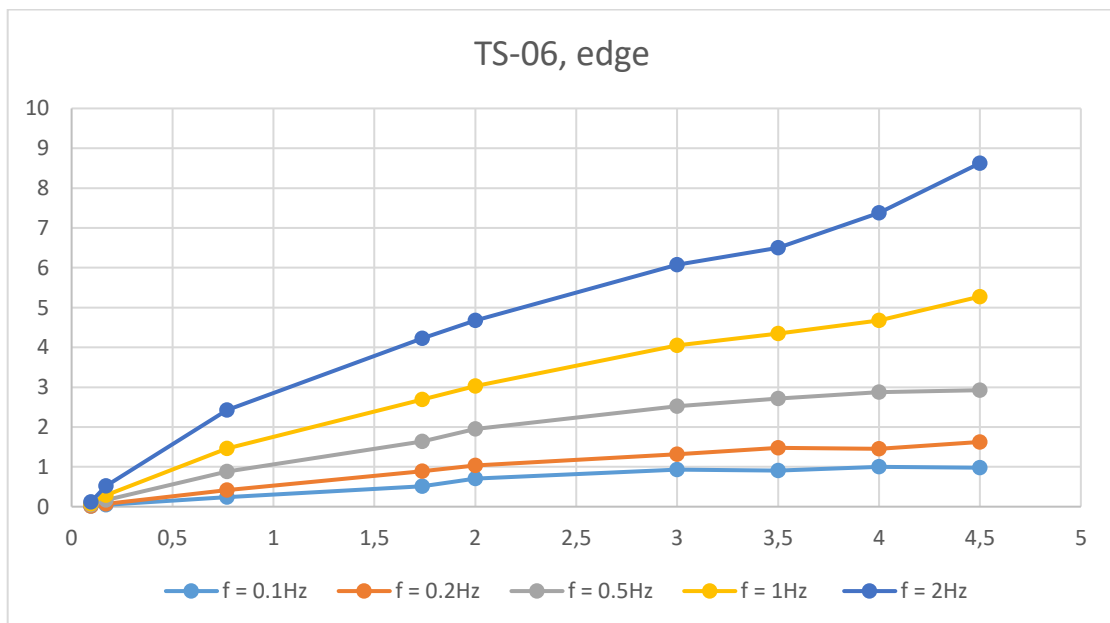
Διάγραμμα 35 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



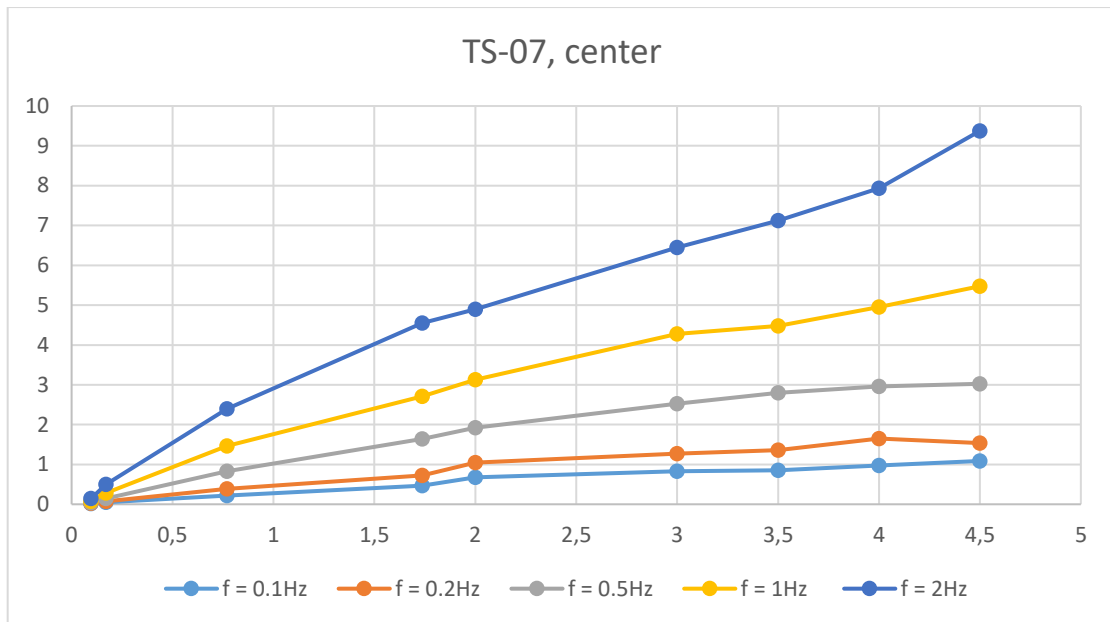
Διάγραμμα 36 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



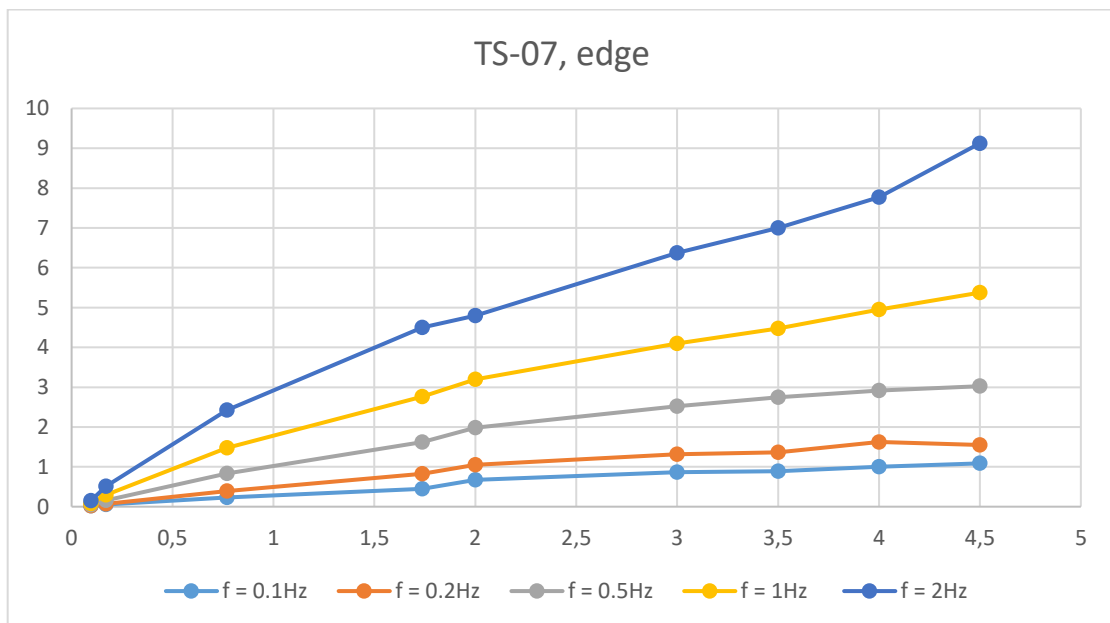
Διάγραμμα 37 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



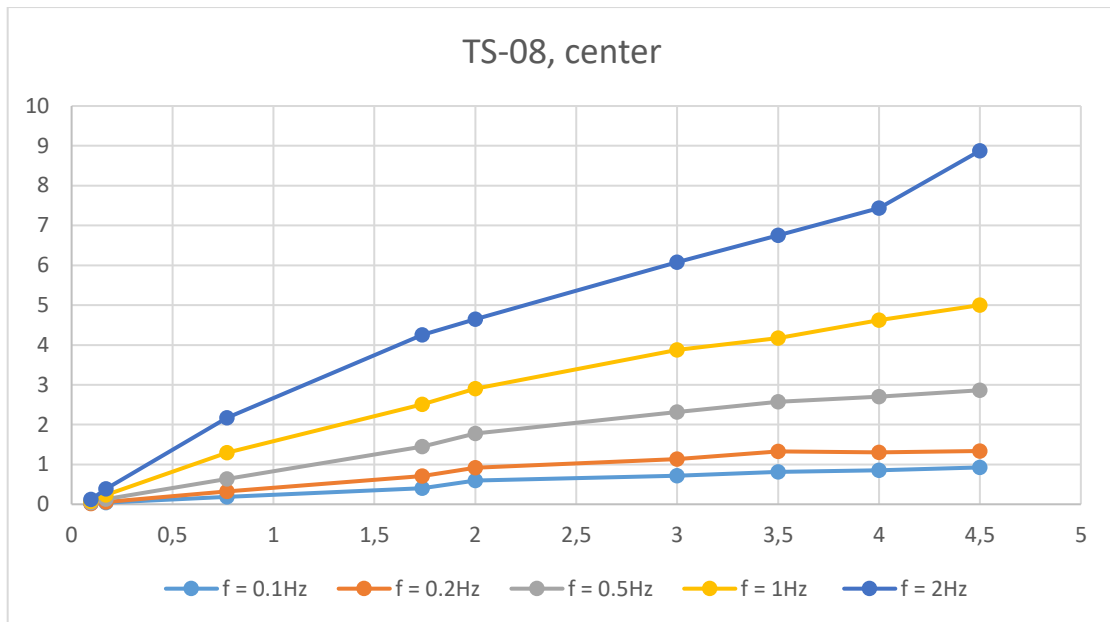
Διάγραμμα 38 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



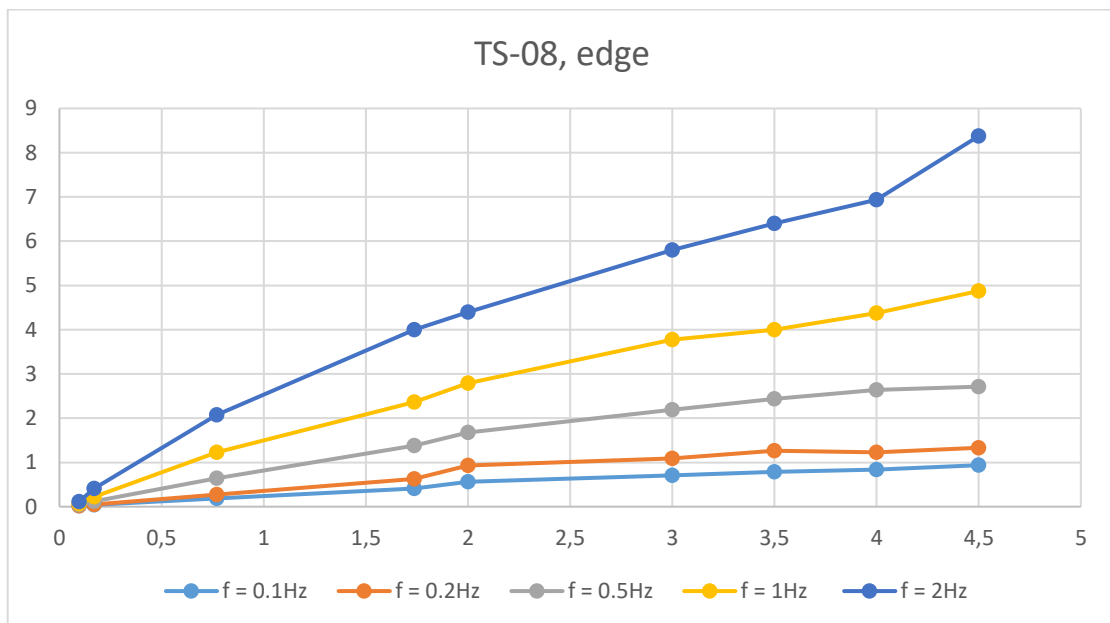
Διάγραμμα 39 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



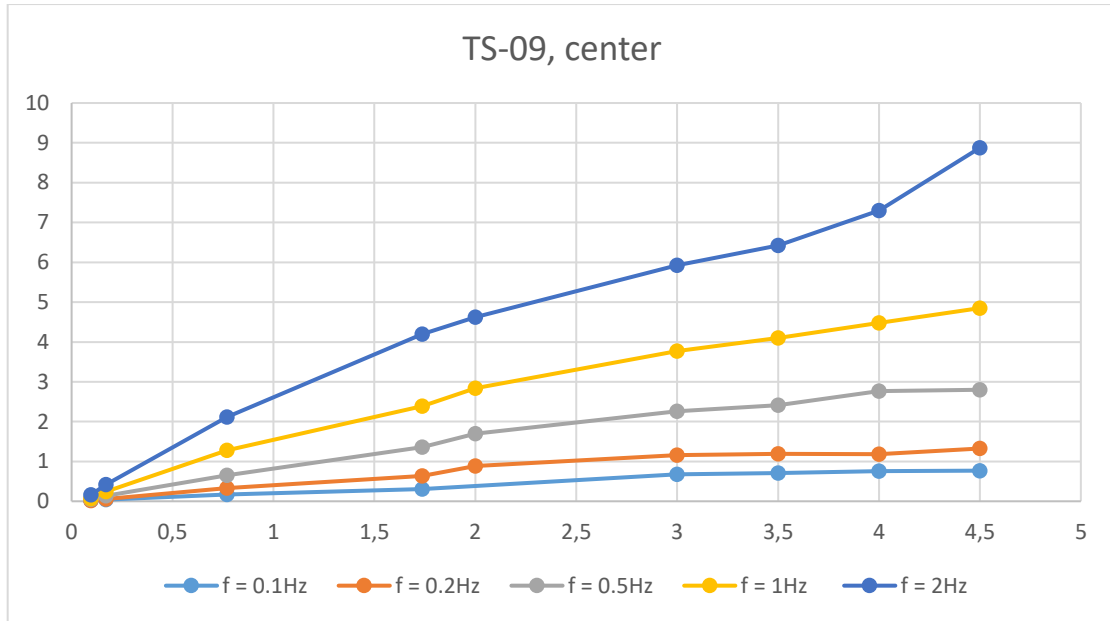
Διάγραμμα 40 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



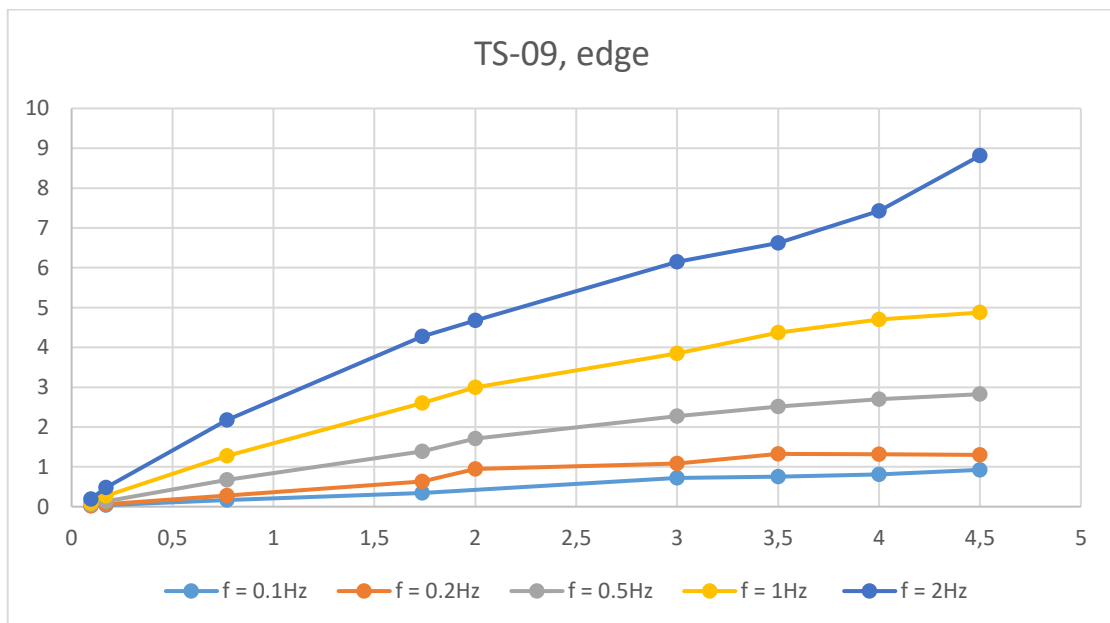
Διάγραμμα 41 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



Διάγραμμα 42 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



Διάγραμμα 43 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



Διάγραμμα 44 – Ο άξονας x δείχνει την τάση εισόδου  $V_{in}$ , ο άξονας y δείχνει την τάση εξόδου  $V_{out}$ . Στον τίτλο του διαγράμματος αναγράφεται το δοκίμιο που μετρήθηκε και η τοποθεσία τοποθέτησης του αισθητήρα.



## 2.6. Επεξεργασία Δεδομένων Μετρήσεων

Κατά την επεξεργασία των δεδομένων που λήφθηκαν από την πειραματική διαδικασία παρατηρήθηκε, μέσω των διαγραμμάτων Τάσης Εισόδου – Τάσης Εξόδου, ότι στο εύρος τάσης 95.75mV – 4.5V, ο λόγος  $V_{out}/V_{in}$  εμφανίζει συμπεριφορά η οποία θα μοντελοποιηθεί με προσεγγιστικό μοντέλο πολυωνυμικής μορφής δεύτερης τάξης.

$$V_{out} = c_2 V_{in}^2 + c_1 V_{in} + b \quad (2.1)$$

Η μεθοδολογία αυτή οδηγεί στην ανάπτυξη μοντέλων που περιγράφουν με ακρίβεια τη συμπεριφορά των μετρήσεων και κατά προέκταση των δοκιμών στα πλαίσια του πειράματος που εκπονήθηκε. Ο δείκτης που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της ακρίβειας της μοντελοποίησης ήταν ο R-squared και οι p-values των αναλύσεων διασποράς (Two tailed ANOVA) βρέθηκαν σημαντικά μικρότερες του 0.05, όπως ήταν αναμενόμενο εφόσον ήδη έχει αναπτυχθεί η συσχέτιση μέσω της θεωρίας ανάμεσα στα δύο μεγέθη. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας δεν θα παρουσιαστούν οι πίνακες ανάλυσης διασποράς.

Οι συντελεστές  $c_2$ ,  $c_1$  και  $b$  θα παρουσιαστούν παρακάτω σε μορφή πινάκων και σε μορφή διαγραμμάτων. Οι συντελεστές αυτοί και η συμβολή τους στο μοντέλο έχουν την αντιστοιχία της μαγνητικής διαπερατότητας στο σημείο κορεσμού του βρόχου υστέρησης, για τα εκάστοτε δεδομένα του μαγνητικού κυκλώματος (μαγνητική επαγωγή, εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, συχνότητα).

| RX-01<br>center |           |           |           |           | RX-01<br>edge |    |           |           |           |           |           |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                 | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz       |    | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz   |
| c2              | -0,058158 | -0,096553 | -0,168574 | -0,239534 | -0,252801     | c2 | -0,048706 | -0,094755 | -0,170952 | -0,2176   | -0,235782 |
| c1              | 0,5860489 | 1,0039991 | 1,7189547 | 2,497393  | 3,2370337     | c1 | 0,5583649 | 1,0005471 | 1,6741571 | 2,4059691 | 3,1243461 |
| b               | 0,0110922 | 0,0021559 | 0,1012542 | 0,2708166 | 0,6192429     | b  | 0,0192707 | -0,060191 | 0,1367489 | 0,3498432 | 0,7173752 |

Πίνακας 3 – Πίνακας τιμών των συντελεστών c2, c1 και της σταθεράς b του δοκιμίου που περιγράφεται στον τίτλο του πίνακα. Αριστερά για το κέντρο, δεξιά για την άκρη του δοκιμίου.

| RX-02<br>center |           |           |           |           | RX-02<br>edge |    |           |           |           |           |           |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                 | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz       |    | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz   |
| c2              | -0,042972 | -0,073691 | -0,119361 | -0,2424   | -0,249595     | c2 | -0,063841 | -0,085971 | -0,168146 | -0,242852 | -0,258918 |
| c1              | 0,495656  | 0,8504926 | 1,4779486 | 2,4748632 | 3,175008      | c1 | 0,638102  | 0,9651179 | 1,7235528 | 2,4969222 | 3,2344697 |
| b               | 0,0418875 | 0,0027674 | 0,0916186 | 0,2024511 | 0,6160593     | b  | -0,014422 | 0,0016343 | 0,1009718 | 0,2811464 | 0,6304039 |

Πίνακας 4 – Πίνακας τιμών των συντελεστών c2, c1 και της σταθεράς b του δοκιμίου που περιγράφεται στον τίτλο του πίνακα. Αριστερά για το κέντρο, δεξιά για την άκρη του δοκιμίου.

| RX-03<br>center |           |           |           |           | RX-03<br>edge |    |           |           |           |           |           |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                 | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz       |    | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz   |
| c2              | -0,037171 | -0,096491 | -0,125242 | -0,193855 | -0,225422     | c2 | -0,044525 | -0,074642 | -0,119386 | -0,210104 | -0,247337 |
| c1              | 0,4821367 | 0,8776468 | 1,4035047 | 2,155295  | 2,956058      | c1 | 0,4741396 | 0,7864086 | 1,3930124 | 2,2367858 | 3,0825424 |
| b               | 0,0194808 | -0,021436 | -0,006597 | 0,1134118 | 0,3969633     | b  | 0,0028503 | -0,032753 | 0,0262873 | 0,1175538 | 0,2709109 |

Πίνακας 5 – Πίνακας τιμών των συντελεστών c2, c1 και της σταθεράς b του δοκιμίου που περιγράφεται στον τίτλο του πίνακα. Αριστερά για το κέντρο, δεξιά για την άκρη του δοκιμίου.

| RX-04<br>center |           |           |           |           | RX-04<br>edge |    |           |           |           |           |           |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                 | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz       |    | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz   |
| c2              | -0,048822 | -0,097607 | -0,168627 | -0,194855 | -0,268416     | c2 | -0,074011 | -0,093951 | -0,175656 | -0,238151 | -0,270265 |
| c1              | 0,5713929 | 1,0133582 | 1,7159082 | 2,3635686 | 3,2763688     | c1 | 0,6903804 | 1,0213924 | 1,7374901 | 2,4657413 | 3,2063877 |
| b               | -0,000306 | -0,026691 | 0,0593072 | 0,2283527 | 0,6821071     | b  | -0,01224  | 0,0165978 | 0,1376358 | 0,3586792 | 0,7391039 |

Πίνακας 6 – Πίνακας τιμών των συντελεστών c2, c1 και της σταθεράς b του δοκιμίου που περιγράφεται στον τίτλο του πίνακα. Αριστερά για το κέντρο, δεξιά για την άκρη του δοκιμίου.

| RX-05<br>center |           |           |           |           | RX-05<br>edge |    |           |           |           |           |           |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                 | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz       |    | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz   |
| c2              | -0,055498 | -0,085148 | -0,150991 | -0,233554 | -0,260626     | c2 | -0,051312 | -0,06574  | -0,150363 | -0,236637 | -0,287552 |
| c1              | 0,6083195 | 0,9780683 | 1,6011915 | 2,4153298 | 3,1526966     | c1 | 0,5427059 | 0,8408146 | 1,5997189 | 2,412513  | 3,2429344 |
| b               | -0,001128 | 0,0232761 | 0,1035341 | 0,2530983 | 0,6332559     | b  | 0,0327279 | -0,012306 | 0,0727816 | 0,259522  | 0,5526908 |

Πίνακας 7 – Πίνακας τιμών των συντελεστών c2, c1 και της σταθεράς b του δοκιμίου που περιγράφεται στον τίτλο του πίνακα. Αριστερά για το κέντρο, δεξιά για την άκρη του δοκιμίου.

| RX-06<br>center |           |           |           |           | RX-06<br>edge |    |           |           |           |           |           |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                 | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz       |    | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz   |
| c2              | -0,035637 | -0,091804 | -0,119202 | -0,209031 | -0,246071     | c2 | -0,045188 | -0,08862  | -0,135903 | -0,190298 | -0,231834 |
| c1              | 0,515136  | 0,9926808 | 1,4464504 | 2,2859411 | 3,0538118     | c1 | 0,5206023 | 0,9063707 | 1,4798542 | 2,1097733 | 2,8716664 |
| b               | 0,033381  | 0,0126747 | 0,2133845 | 0,2866518 | 0,6716761     | b  | -0,00387  | -0,022946 | 0,0547797 | 0,266141  | 0,5661449 |

Πίνακας 8 – Πίνακας τιμών των συντελεστών c2, c1 και της σταθεράς b του δοκιμίου που περιγράφεται στον τίτλο του πίνακα. Αριστερά για το κέντρο, δεξιά για την άκρη του δοκιμίου.

| RX-07<br>center |           |           |           |           | RX-07<br>edge |    |           |           |           |           |           |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                 | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz       |    | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz   |
| c2              | -0,044129 | -0,075669 | -0,107916 | -0,173996 | -0,226019     | c2 | -0,041906 | -0,040756 | -0,102629 | -0,115094 | -0,177113 |
| c1              | 0,5054641 | 0,8159256 | 1,3025832 | 2,0188309 | 2,8120959     | c1 | 0,3799364 | 0,5706985 | 1,1005167 | 1,5762228 | 2,312795  |
| b               | -0,017982 | -0,017268 | 0,1172113 | 0,2348839 | 0,5099239     | b  | 0,0015658 | -0,016532 | -0,030736 | 0,0907689 | 0,2509168 |

Πίνακας 9 – Πίνακας τιμών των συντελεστών c2, c1 και της σταθεράς b του δοκιμίου που περιγράφεται στον τίτλο του πίνακα. Αριστερά για το κέντρο, δεξιά για την άκρη του δοκιμίου.

| GG-01<br>center |           |           |           |           | GG-01<br>edge |    |           |           |           |           |           |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                 | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz       |    | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz   |
| c2              | -0,06054  | -0,105261 | -0,164068 | -0,251765 | -0,246968     | c2 | -0,045228 | -0,096569 | -0,162023 | -0,242413 | -0,257959 |
| c1              | 0,6715796 | 1,048201  | 1,7740075 | 2,6592085 | 3,3770547     | c1 | 0,5600866 | 0,9798884 | 1,6984191 | 2,5266485 | 3,3230629 |
| b               | -0,016516 | 0,0146121 | 0,0814403 | 0,2185741 | 0,6153692     | b  | -0,014089 | -0,015377 | 0,0639554 | 0,1939157 | 0,4897979 |

Πίνακας 10 – Πίνακας τιμών των συντελεστών c2, c1 και της σταθεράς b του δοκιμίου που περιγράφεται στον τίτλο του πίνακα. Αριστερά για το κέντρο, δεξιά για την άκρη του δοκιμίου.

| GG-02<br>center |           |           |           |           | GG-02<br>edge |    |           |           |           |           |           |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                 | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz       |    | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz   |
| c2              | -0,110802 | -0,09827  | -0,185998 | -0,250087 | -0,262647     | c2 | -0,061746 | -0,092644 | -0,152388 | -0,228608 | -0,262062 |
| c1              | 0,8791144 | 1,0345173 | 1,8588368 | 2,6330898 | 3,4854018     | c1 | 0,6337155 | 0,9625587 | 1,6529815 | 2,4815761 | 3,3678736 |
| b               | -0,049966 | 0,0344109 | 0,1150695 | 0,3286691 | 0,6894412     | b  | -0,030714 | -0,012153 | 0,0683428 | 0,2006416 | 0,5014711 |

Πίνακας 11 – Πίνακας τιμών των συντελεστών c2, c1 και της σταθεράς b του δοκιμίου που περιγράφεται στον τίτλο του πίνακα. Αριστερά για το κέντρο, δεξιά για την άκρη του δοκιμίου.

| GG-03<br>center |           |           |           |           | GG-03<br>edge |    |           |           |           |           |           |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                 | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz       |    | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz   |
| c2              | -0,060608 | -0,090195 | -0,218533 | -0,227425 | -0,272151     | c2 | -0,073343 | -0,110561 | -0,196284 | -0,243439 | -0,273966 |
| c1              | 0,6726598 | 1,0371825 | 1,9742925 | 2,5660895 | 3,5028112     | c1 | 0,7405692 | 1,1231879 | 1,8863728 | 2,6177434 | 3,4468024 |
| b               | 0,0123883 | 0,0135209 | 0,0883125 | 0,3043224 | 0,751521      | b  | -0,003956 | 0,0349402 | 0,1779212 | 0,4099602 | 0,7896545 |

Πίνακας 12 – Πίνακας τιμών των συντελεστών c2, c1 και της σταθεράς b του δοκιμίου που περιγράφεται στον τίτλο του πίνακα. Αριστερά για το κέντρο, δεξιά για την άκρη του δοκιμίου.

| GG-04<br>center |           |           |           |           | GG-04<br>edge |    |           |           |           |           |           |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                 | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz       |    | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz   |
| c2              | -0,021652 | -0,129202 | -0,157174 | -0,200446 | -0,235826     | c2 | -0,028359 | -0,072421 | -0,172524 | -0,181034 | -0,262518 |
| c1              | 0,4910096 | 1,1087329 | 1,6979726 | 2,3954867 | 3,261536      | c1 | 0,5019421 | 0,8894881 | 1,7700413 | 2,3170122 | 3,392447  |
| b               | -0,013808 | -0,049908 | 0,0056685 | 0,1628669 | 0,4901797     | b  | -0,001364 | -0,011548 | 0,0012271 | 0,2550335 | 0,3880086 |

Πίνακας 13 – Πίνακας τιμών των συντελεστών c2, c1 και της σταθεράς b του δοκιμίου που περιγράφεται στον τίτλο του πίνακα. Αριστερά για το κέντρο, δεξιά για την άκρη του δοκιμίου.

| GG-05<br>center |           |           |           |           | GG-05<br>edge |    |           |           |           |           |           |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                 | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz       |    | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz   |
| c2              | -0,046503 | -0,080908 | -0,101388 | -0,155948 | -0,234759     | c2 | -0,040337 | -0,070104 | -0,119678 | -0,178682 | -0,179571 |
| c1              | 0,4846071 | 0,7858547 | 1,2470091 | 2,0023318 | 3,0095993     | c1 | 0,4633966 | 0,7513106 | 1,3708412 | 2,1312485 | 2,8132924 |
| b               | -0,035688 | -0,035    | 0,00427   | 0,0852061 | 0,2747033     | b  | -0,020252 | -0,031745 | 0,0171127 | 0,1337668 | 0,3781604 |

Πίνακας 14 – Πίνακας τιμών των συντελεστών c2, c1 και της σταθεράς b του δοκιμίου που περιγράφεται στον τίτλο του πίνακα. Αριστερά για το κέντρο, δεξιά για την άκρη του δοκιμίου.

| GG-06<br>center |           |           |           |           | GG-06<br>edge |    |           |           |           |           |           |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                 | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz       |    | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz   |
| c2              | -0,043888 | -0,068109 | -0,13961  | -0,207955 | -0,238144     | c2 | -0,044021 | -0,071094 | -0,135181 | -0,220371 | -0,286149 |
| c1              | 0,4800748 | 0,8148383 | 1,5482163 | 2,3396471 | 3,1660354     | c1 | 0,5026552 | 0,8118712 | 1,4929403 | 2,3677682 | 3,3250846 |
| b               | -0,004588 | -0,022644 | 0,0353143 | 0,1272631 | 0,5028826     | b  | -0,00446  | -0,02353  | 0,0406658 | 0,1193852 | 0,3805308 |

Πίνακας 15 – Πίνακας τιμών των συντελεστών c2, c1 και της σταθεράς b του δοκιμίου που περιγράφεται στον τίτλο του πίνακα. Αριστερά για το κέντρο, δεξιά για την άκρη του δοκιμίου.

| TS-01<br>center |           |           |           |           | TS-01<br>edge |    |           |           |           |           |           |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                 | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz       |    | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz   |
| c2              | -0,034027 | -0,055548 | -0,089944 | -0,120791 | -0,144466     | c2 | -0,038595 | -0,053194 | -0,092675 | -0,122113 | -0,135869 |
| c1              | 0,3812248 | 0,5784309 | 1,0011228 | 1,5203076 | 2,1570767     | c1 | 0,382121  | 0,5453552 | 0,9882665 | 1,5228944 | 2,0909331 |
| b               | -0,04965  | -0,038464 | -0,026891 | -0,007678 | 0,1093462     | b  | -0,052729 | -0,039524 | -0,0602   | -0,025489 | 0,1359715 |

Πίνακας 16 – Πίνακας τιμών των συντελεστών c2, c1 και της σταθεράς b του δοκιμίου που περιγράφεται στον τίτλο του πίνακα. Αριστερά για το κέντρο, δεξιά για την άκρη του δοκιμίου.

| TS-02<br>center |           |           |           |           | TS-02<br>edge |    |           |           |           |           |           |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                 | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz       |    | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz   |
| c2              | -0,020548 | -0,049127 | -0,078963 | -0,104134 | -0,112869     | c2 | -0,030061 | -0,049588 | -0,078307 | -0,109561 | -0,119635 |
| c1              | 0,2869112 | 0,4979959 | 0,8955974 | 1,3783612 | 1,9776795     | c1 | 0,335992  | 0,5101981 | 0,8902684 | 1,4168139 | 1,9786403 |
| b               | -0,026389 | -0,042832 | -0,063462 | -0,048125 | 0,0387249     | b  | -0,038912 | -0,054076 | -0,061224 | -0,053071 | 0,0488455 |

Πίνακας 17 – Πίνακας τιμών των συντελεστών c2, c1 και της σταθεράς b του δοκιμίου που περιγράφεται στον τίτλο του πίνακα. Αριστερά για το κέντρο, δεξιά για την άκρη του δοκιμίου.

| TS-03<br>center |           |           |           |           | TS-03<br>edge |    |           |           |           |           |           |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                 | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz       |    | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz   |
| c2              | -0,03538  | -0,060648 | -0,097895 | -0,14165  | -0,131132     | c2 | -0,032489 | -0,056812 | -0,097525 | -0,137068 | -0,133313 |
| c1              | 0,3764614 | 0,5965701 | 1,0562531 | 1,6460691 | 2,2400811     | c1 | 0,3777172 | 0,5831747 | 1,0497738 | 1,6328478 | 2,2302261 |
| b               | -0,03072  | -0,047389 | -0,05512  | -0,045841 | 0,090185      | b  | -0,034019 | -0,037889 | -0,050014 | -0,025994 | 0,1140181 |

Πίνακας 18 – Πίνακας τιμών των συντελεστών c2, c1 και της σταθεράς b του δοκιμίου που περιγράφεται στον τίτλο του πίνακα. Αριστερά για το κέντρο, δεξιά για την άκρη του δοκιμίου.

| TS-04<br>center |           |           |           |           | TS-04<br>edge |    |           |           |           |           |           |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                 | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz       |    | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz   |
| c2              | -0,037331 | -0,067836 | -0,112347 | -0,149959 | -0,152457     | c2 | -0,032292 | -0,059838 | -0,096919 | -0,159531 | -0,154223 |
| c1              | 0,4126213 | 0,6489049 | 1,1711874 | 1,762253  | 2,4557732     | c1 | 0,3730117 | 0,6062595 | 1,0724972 | 1,7438027 | 2,3437142 |
| b               | -0,036844 | -0,04829  | -0,055157 | -0,014642 | 0,1333236     | b  | -0,026106 | -0,044813 | -0,042711 | -0,047462 | 0,100353  |

Πίνακας 19 – Πίνακας τιμών των συντελεστών c2, c1 και της σταθεράς b του δοκιμίου που περιγράφεται στον τίτλο του πίνακα. Αριστερά για το κέντρο, δεξιά για την άκρη του δοκιμίου.

| TS-05<br>center |           |           |           |           | TS-05<br>edge |    |           |           |           |           |           |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                 | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz       |    | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz   |
| c2              | -0,02737  | -0,061756 | -0,105263 | -0,124914 | -0,127089     | c2 | -0,030911 | -0,058688 | -0,111748 | -0,120451 | -0,135028 |
| c1              | 0,3730203 | 0,642443  | 1,1538299 | 1,724128  | 2,4304884     | c1 | 0,3774204 | 0,6096704 | 1,149778  | 1,6325484 | 2,3588593 |
| b               | -0,029306 | -0,040819 | -0,038106 | 0,0057368 | 0,1413537     | b  | -0,028359 | -0,04252  | -0,06282  | -0,001842 | 0,1251446 |

Πίνακας 20 – Πίνακας τιμών των συντελεστών c2, c1 και της σταθεράς b του δοκιμίου που περιγράφεται στον τίτλο του πίνακα. Αριστερά για το κέντρο, δεξιά για την άκρη του δοκιμίου.

| TS-06<br>center |           |           |           |         |         |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|
|                 | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz | f = 2Hz |

|    |           |           |           |           |           |
|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| c2 | -0,044876 | -0,078935 | -0,129486 | -0,176557 | -0,153693 |
| c1 | 0,5051001 | 0,8052212 | 1,3673294 | 2,0848524 | 2,724631  |
| b  | -0,031739 | -0,021355 | 0,0140205 | 0,0778838 | 0,3110433 |

| TS-06<br>edge |           |           |           |         |         |
|---------------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|
|               | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz | f = 2Hz |

|    |           |           |           |           |           |
|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| c2 | -0,048154 | -0,064389 | -0,126979 | -0,142702 | -0,157587 |
| c1 | 0,4484313 | 0,6500594 | 1,2338091 | 1,7725632 | 2,4843052 |
| b  | -0,044229 | -0,04035  | -0,045236 | 0,0150207 | 0,1877723 |

Πίνακας 21 – Πίνακας τιμών των συντελεστών c2, c1 και της σταθεράς b του δοκιμίου που περιγράφεται στον τίτλο του πίνακα. Αριστερά για το κέντρο, δεξιά για την άκρη του δοκιμίου.

| TS-07<br>center |           |           |           |         |         |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|
|                 | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz | f = 2Hz |

|    |           |           |           |           |           |
|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| c2 | -0,02543  | -0,049956 | -0,116654 | -0,142198 | -0,148973 |
| c1 | 0,3530879 | 0,5896854 | 1,2172892 | 1,8290197 | 2,6169961 |
| b  | -0,015911 | -0,037742 | -0,063096 | -0,00738  | 0,1488279 |

| TS-07<br>edge |           |           |           |         |         |
|---------------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|
|               | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz | f = 2Hz |

|    |           |           |           |           |           |
|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| c2 | -0,025402 | -0,060142 | -0,119551 | -0,150467 | -0,15697  |
| c1 | 0,3588264 | 0,6329067 | 1,2213231 | 1,8442006 | 2,5997435 |
| b  | -0,017608 | -0,041726 | -0,055541 | 0,0059254 | 0,1655951 |

Πίνακας 22 – Πίνακας τιμών των συντελεστών c2, c1 και της σταθεράς b του δοκιμίου που περιγράφεται στον τίτλο του πίνακα. Αριστερά για το κέντρο, δεξιά για την άκρη του δοκιμίου.

| TS-08<br>center |           |           |           |         |         |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|
|                 | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz | f = 2Hz |

|    |           |           |           |           |           |
|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| c2 | -0,025201 | -0,05911  | -0,094349 | -0,134038 | -0,142842 |
| c1 | 0,3224197 | 0,5804924 | 1,0786748 | 1,704775  | 2,4951444 |
| b  | -0,018908 | -0,055312 | -0,07766  | -0,031477 | 0,0765968 |

| TS-08<br>edge |           |           |           |         |         |
|---------------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|
|               | f = 0.1Hz | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz | f = 2Hz |

|    |           |           |           |           |           |
|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| c2 | -0,020672 | -0,051748 | -0,087047 | -0,123431 | -0,139757 |
| c1 | 0,3013833 | 0,5413054 | 1,0147867 | 1,6206314 | 2,3687456 |
| b  | -0,013284 | -0,05812  | -0,061356 | -0,034839 | 0,0862014 |

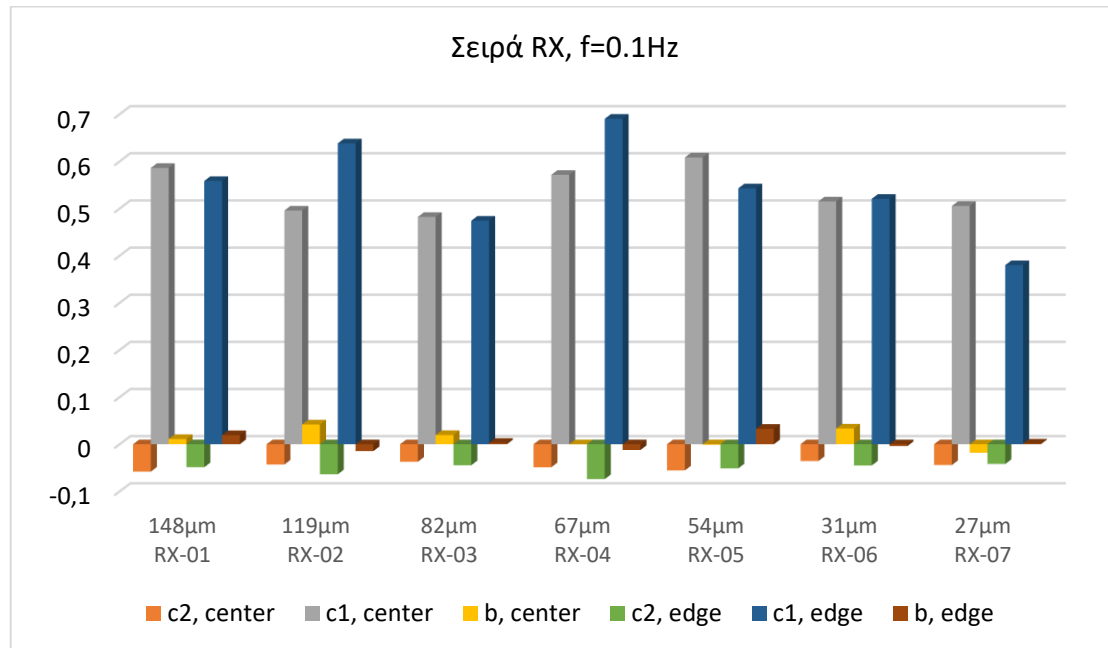
Πίνακας 23 – Πίνακας τιμών των συντελεστών c2, c1 και της σταθεράς b του δοκιμίου που περιγράφεται στον τίτλο του πίνακα. Αριστερά για το κέντρο, δεξιά για την άκρη του δοκιμίου.



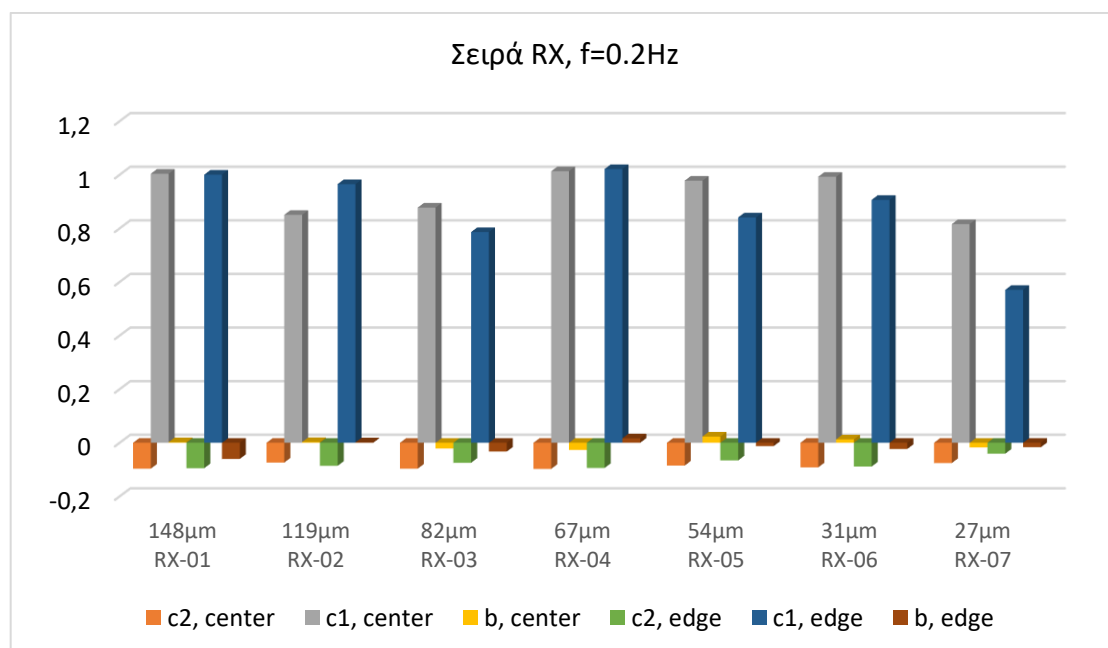
|    | TS-09<br>center |           |           |           |           | TS-09<br>edge |           |           |           |           |
|----|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|    | f = 0.1Hz       | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz   | f = 0.1Hz     | f = 0.2Hz | f = 0.5Hz | f = 1Hz   | f = 2Hz   |
| c2 |                 | -0,053668 | -0,07889  | -0,130623 | -0,119061 |               | -0,055239 | -0,084273 | -0,158676 | -0,143996 |
| c1 |                 | 0,5385083 | 0,9981188 | 1,6572071 | 2,3524498 |               | 0,5620024 | 1,0232103 | 1,8117644 | 2,4711143 |
| b  |                 | -0,041089 | -0,051498 | -0,02666  | 0,1426575 |               | -0,061828 | -0,052105 | -0,050818 | 0,148092  |

Πίνακας 24 – Πίνακας τιμών των συντελεστών  $c_2$ ,  $c_1$  και της σταθεράς  $b$  του δοκιμίου που περιγράφεται στον τίτλο του πίνακα. Αριστερά για το κέντρο, δεξιά για την άκρη του δοκιμίου. Οι τιμές για τη συχνότητα  $f=0.1\text{Hz}$  δεν παρατίθενται καθώς λόγω σφάλματος μέτρησης μια από τις 9 τιμές  $V_{out}$  δεν λαμβάνεται υπόψη και κατά προέκταση λόγω διαφορετικού όγκου δεδομένων κρίνεται άσκοπο να παρατεθεί σε συγκριτικό πίνακα.

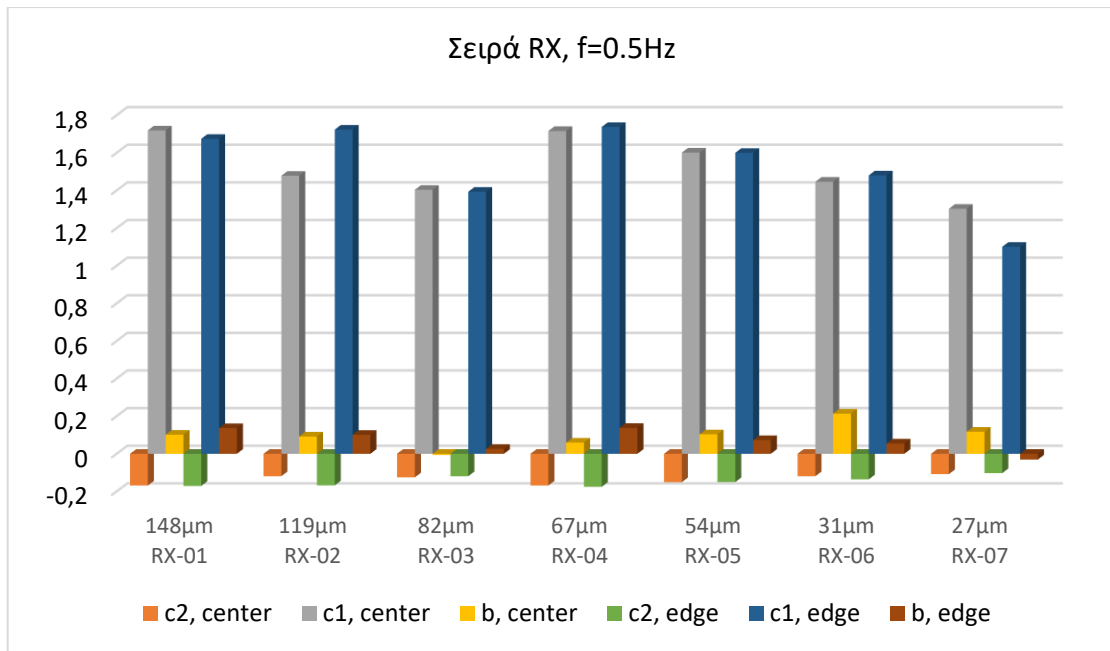
Στη συνέχεια παρουσιάζεται διαγραμματικά το περιεχόμενο των παραπάνω πινάκων, κατηγοριοποιημένο σύμφωνα με την επεξεργασία των δοκιμών, σειρές RX, GG και TS, και ανά συχνότητα διέγερσης. Με αυτό τον τρόπο διακρίνεται ο τρόπος με τον οποίο η επεξεργασία κάθε δοκιμίου επιδρά στη μαγνητική διαπερατότητα του σε σύγκριση με τα υπόλοιπα της σειράς του.



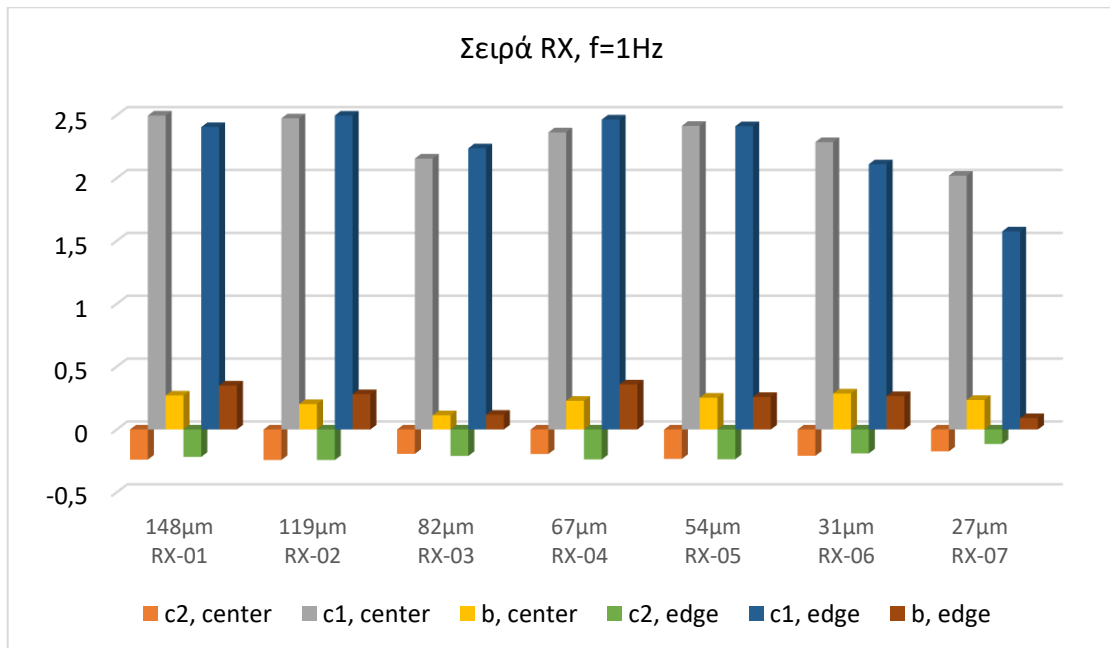
Διάγραμμα 45 – Συγκριτικό διάγραμμα των συντελεστών c2, c1 και b για τη σειρά δοκιμών RX σε σχέση με το μέγεθος του κόκκου του δοκιμίου.



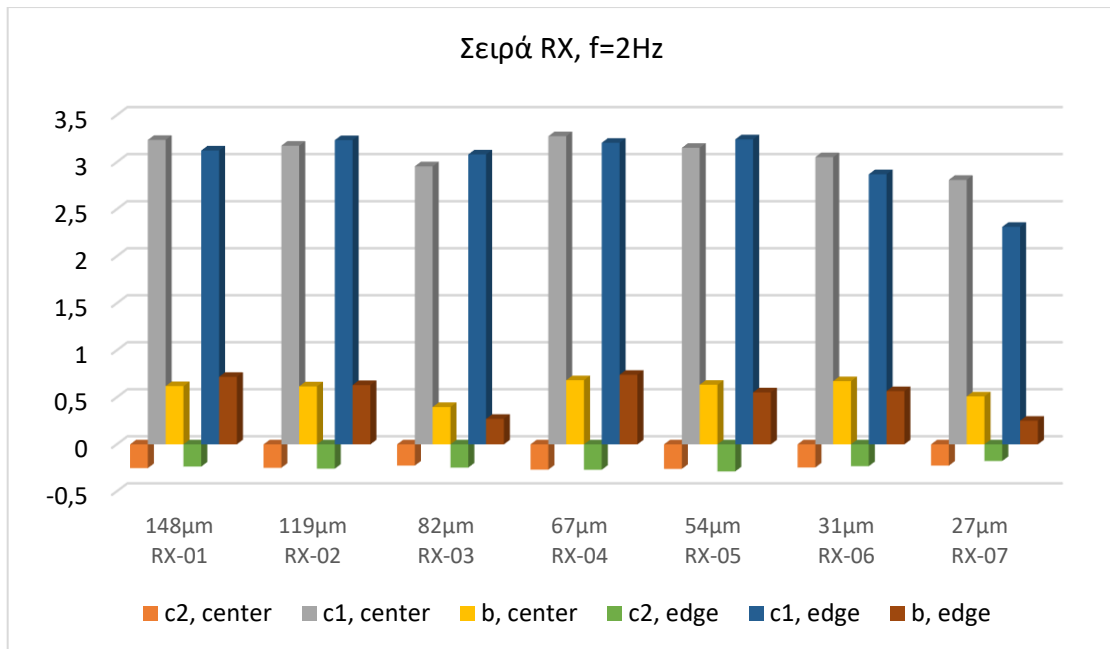
Διάγραμμα 46 – Συγκριτικό διάγραμμα των συντελεστών c2, c1 και b για τη σειρά δοκιμών RX σε σχέση με το μέγεθος του κόκκου του δοκιμίου.



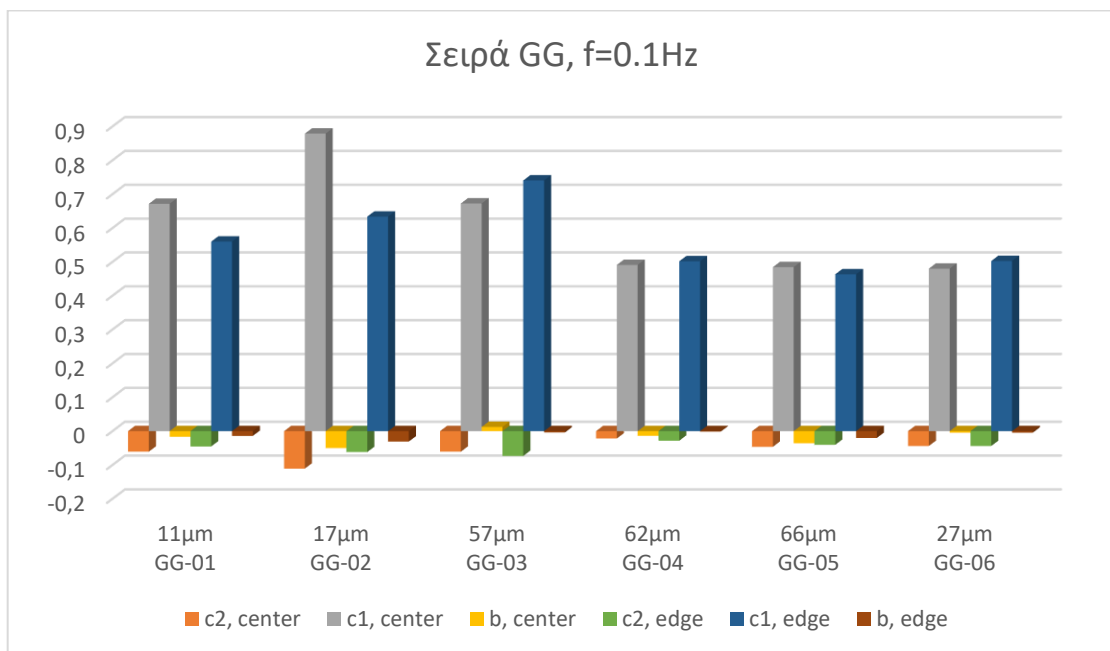
Διάγραμμα 47 – Συγκριτικό διάγραμμα των συντελεστών  $c_2$ ,  $c_1$  και  $b$  για τη σειρά δοκιμών RX σε σχέση με το μέγεθος του κόκκου του δοκιμίου.



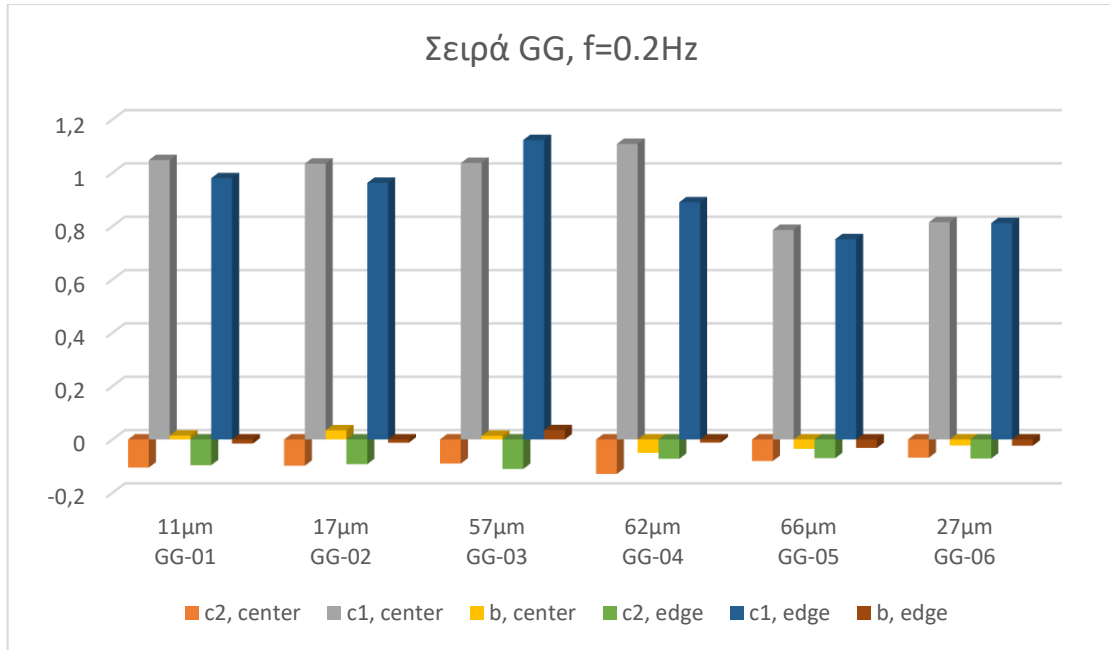
Διάγραμμα 48 – Συγκριτικό διάγραμμα των συντελεστών  $c_2$ ,  $c_1$  και  $b$  για τη σειρά δοκιμών RX σε σχέση με το μέγεθος του κόκκου του δοκιμίου.



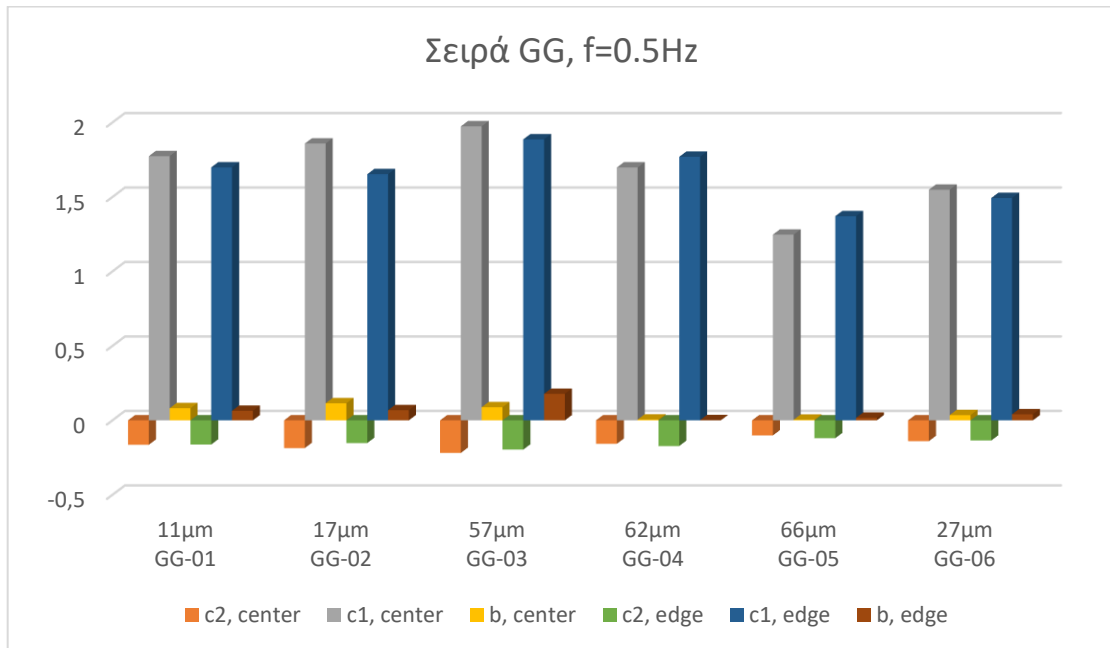
Διάγραμμα 49 – Συγκριτικό διάγραμμα των συντελεστών  $c_2$ ,  $c_1$  και  $b$  για τη σειρά δοκιμών RX σε σχέση με το μέγεθος του κόκκου του δοκιμίου.



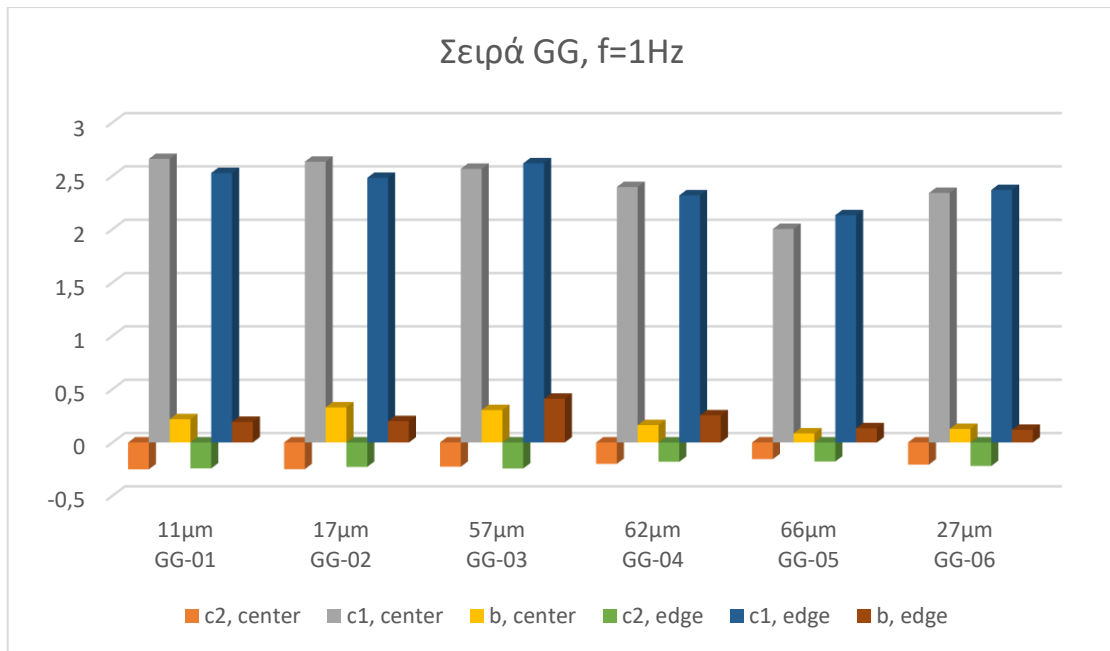
Διάγραμμα 50 – Συγκριτικό διάγραμμα των συντελεστών  $c_2$ ,  $c_1$  και  $b$  για τη σειρά δοκιμών GG σε σχέση με το μέγεθος του κόκκου του δοκιμίου.



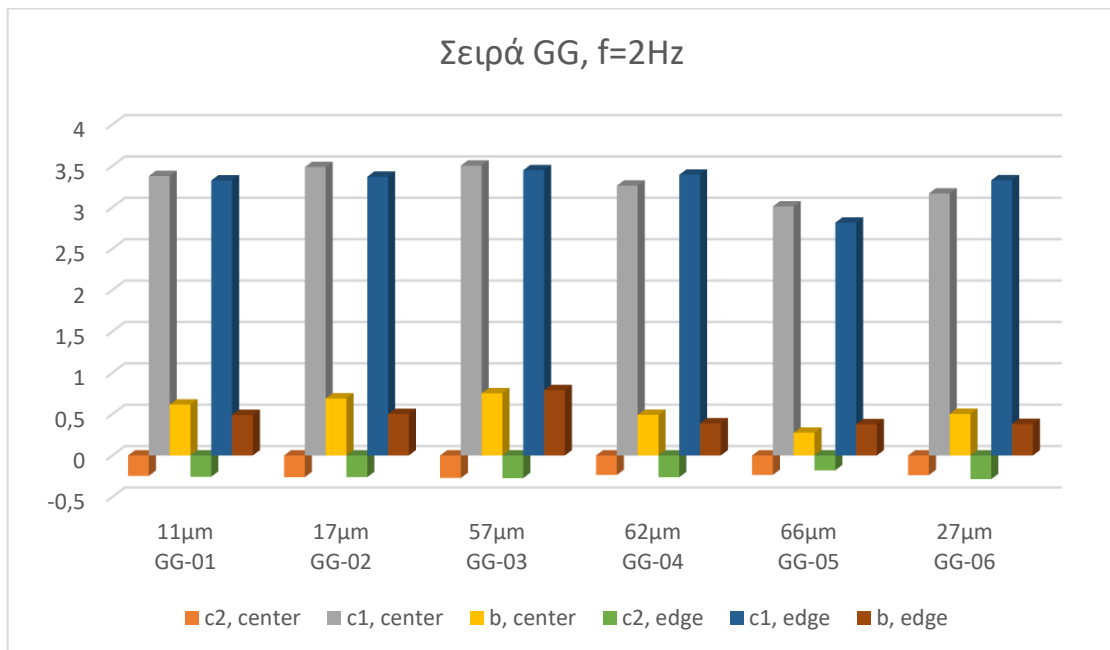
Διάγραμμα 51 – Συγκριτικό διάγραμμα των συντελεστών  $c_2$ ,  $c_1$  και  $b$  για τη σειρά δοκιμών GG σε σχέση με το μέγεθος του κόκκου του δοκιμίου.



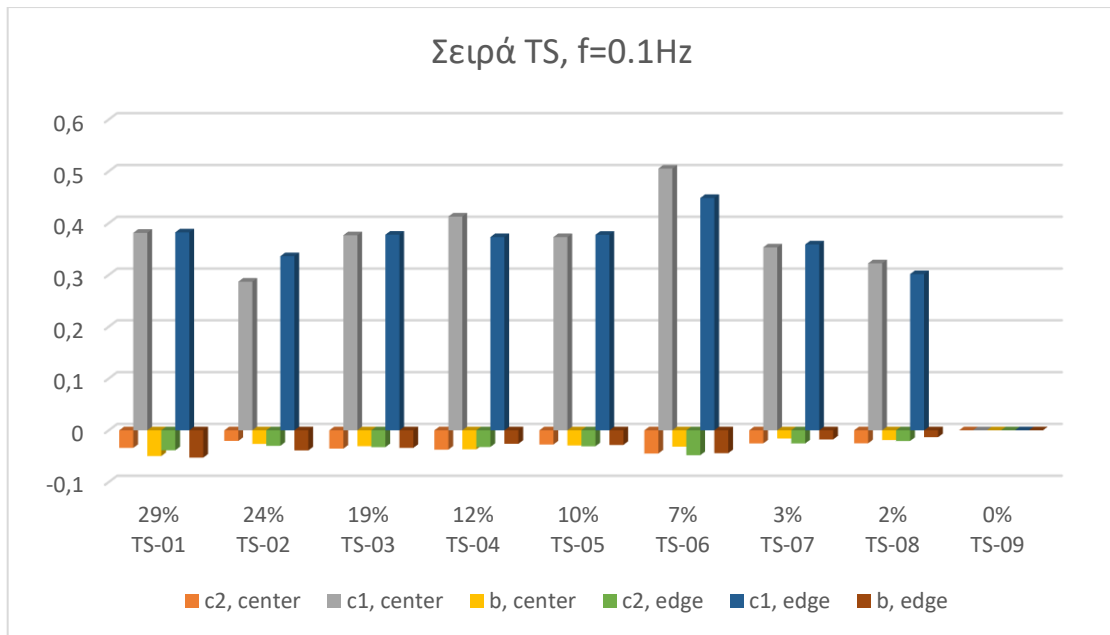
Διάγραμμα 52 – Συγκριτικό διάγραμμα των συντελεστών  $c_2$ ,  $c_1$  και  $b$  για τη σειρά δοκιμών GG σε σχέση με το μέγεθος του κόκκου του δοκιμίου.



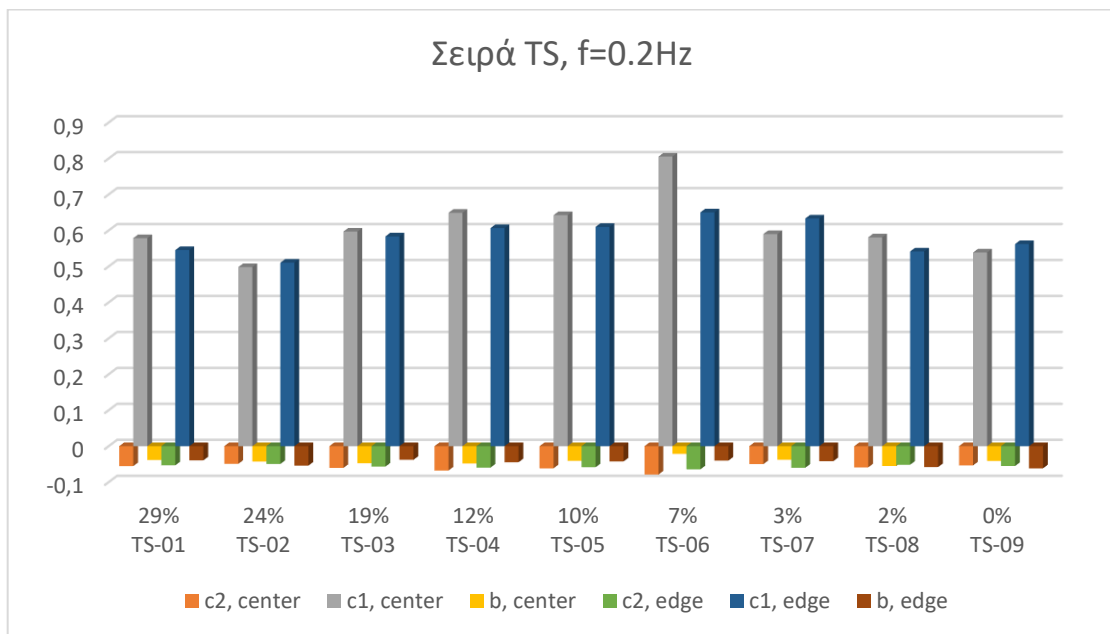
Διάγραμμα 53 – Συγκριτικό διάγραμμα των συντελεστών  $c_2$ ,  $c_1$  και  $b$  για τη σειρά δοκιμών GG σε σχέση με το μέγεθος του κόκκου του δοκιμίου.



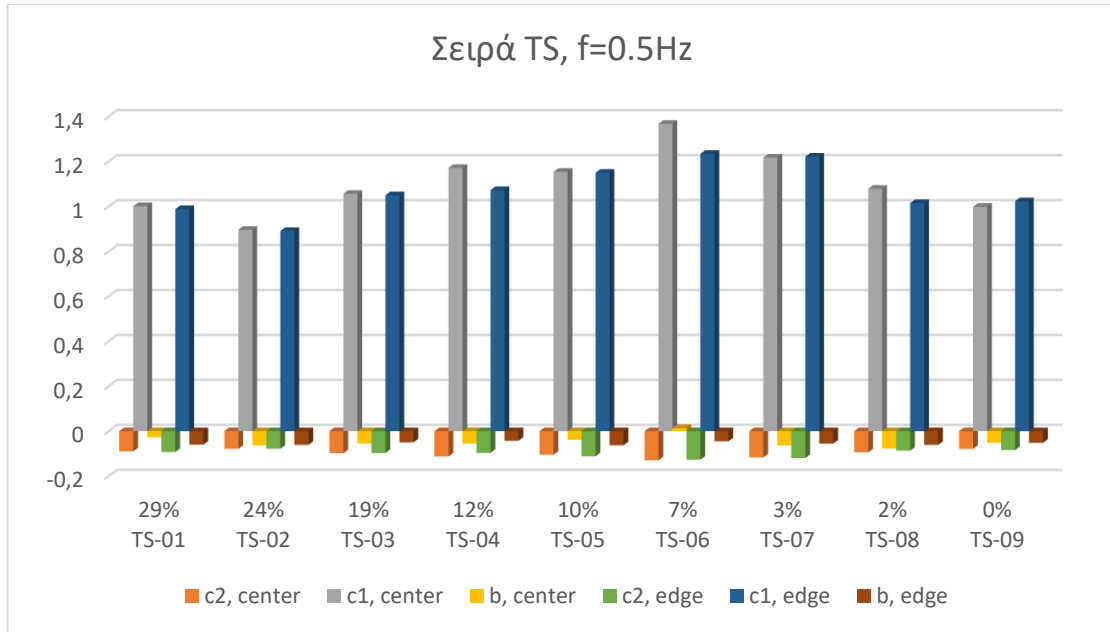
Διάγραμμα 54 – Συγκριτικό διάγραμμα των συντελεστών  $c_2$ ,  $c_1$  και  $b$  για τη σειρά δοκιμών GG σε σχέση με το μέγεθος του κόκκου του δοκιμίου.



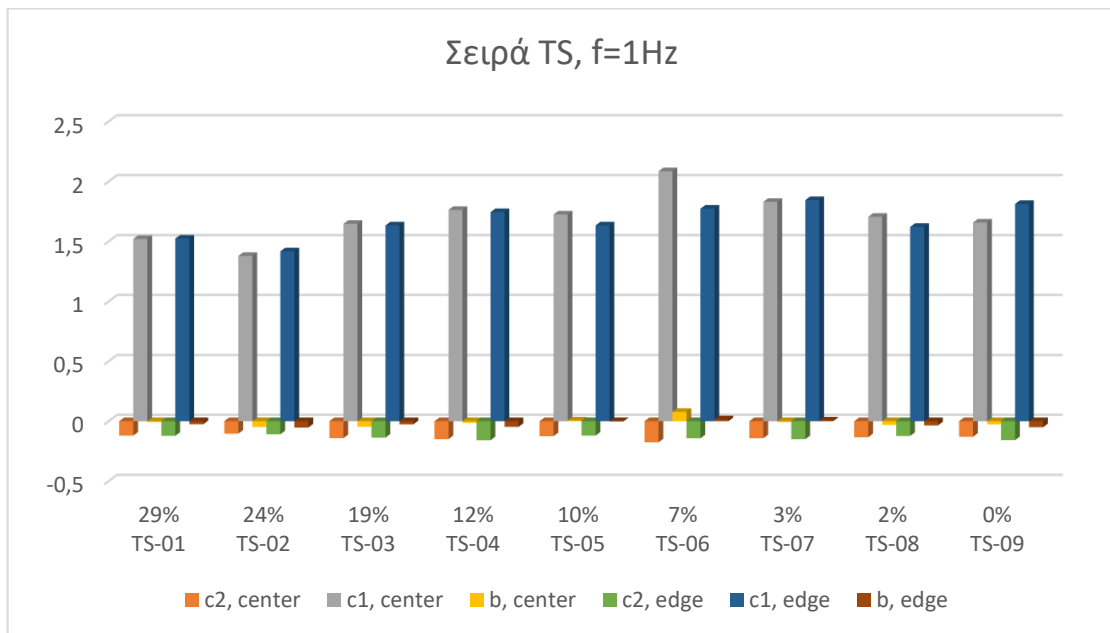
Διάγραμμα 55 – Συγκριτικό διάγραμμα των συντελεστών  $c_2$ ,  $c_1$  και  $b$  για τη σειρά δοκιμών TS σε σχέση με το ποσοστό της παραμόρφωσης.



Διάγραμμα 56 – Συγκριτικό διάγραμμα των συντελεστών  $c_2$ ,  $c_1$  και  $b$  για τη σειρά δοκιμών TS σε σχέση με το ποσοστό της παραμόρφωσης.

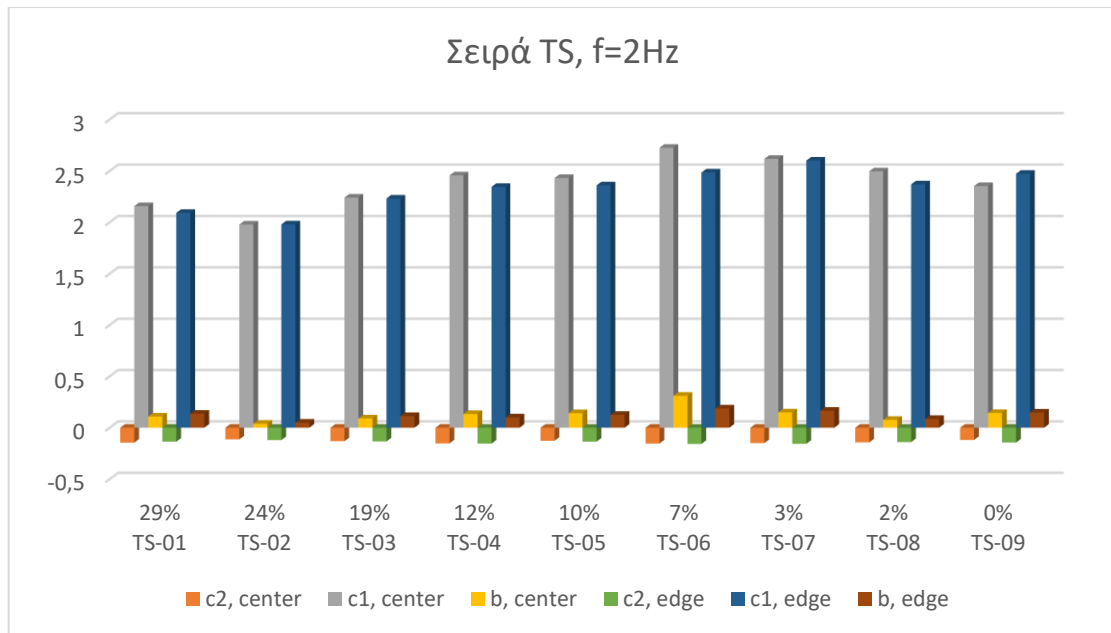


Διάγραμμα 57 – Συγκριτικό διάγραμμα των συντελεστών  $c_2$ ,  $c_1$  και  $b$  για τη σειρά δοκιμών TS σε σχέση με το ποσοστό της παραμόρφωσης.



Διάγραμμα 58 – Συγκριτικό διάγραμμα των συντελεστών  $c_2$ ,  $c_1$  και  $b$  για τη σειρά δοκιμών TS σε σχέση με το ποσοστό της παραμόρφωσης.





Διάγραμμα 59 – Συγκριτικό διάγραμμα των συντελεστών  $c_2$ ,  $c_1$  και  $b$  για τη σειρά δοκιμών TS σε σχέση με το ποσοστό της παραμόρφωσης.

### 3. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία, δοκίμια από ηλεκτρικό χάλυβα τύπου NOES τα οποία υπέστησαν διαφορετικές μορφές επεξεργασίας εξετάστηκαν ως προς τις μαγνητικές τους ιδιότητες σε συνάρτηση με τα χαρακτηριστικά που απέκτησαν ως συνέπεια της επεξεργασίας αυτής. Επίσης, τα δοκίμια έχουν υποβληθεί σε πανομοιότυπες περιβαλλοντικές συνθήκες έκθεσης σε περιβαλλοντικό αέρα χωρίς επίστρωση προστατευτικού ελαίου όπως επίσης και σε παρόμοιες καταπονήσεις έχοντας πλέον υποστεί σκωρίαση, και μερικές παραμορφώσεις.

Με τις παραπάνω παραμέτρους γνωστές, η ανάλυση των αποτελεσμάτων υποδεικνύει για την προσεγγιστική μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε, πολυωνυμική παλινδρόμηση 2<sup>ου</sup> βαθμού με χρήση σταθερού όρου, ότι και στις τρεις σειρές, για το εύρος των τάσεων και συχνοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν, ο κυριότερος όρος που οδηγεί την καμπύλη είναι ο όρος 1<sup>ου</sup> βαθμού,  $c_1 \cdot V_{in}$ .

Σε όλες τις σειρές παρατηρείται αύξηση του λόγου  $V_{out}/V_{in}$  με την αύξηση της συχνότητας.

Και στις τρεις σειρές δοκιμών δεν παρατηρείται κάποια συσχέτιση της σημαντικότητας του συντελεστή του όρου 2<sup>ου</sup> βαθμού με την αύξηση της συχνότητας.

Στη σειρά RX, παρατηρείται μια τάση το μεγαλύτερο μέγεθος κόκκου του υλικού να συμβάλει σε μεγαλύτερη μαγνητική διαπερατότητα όπως υποδεικνύουν τα αποτελέσματα. Επίσης παρατηρείται μια αύξηση της διαπερατότητας για μέγεθος κόκκου 67 $\mu$ m και στη συνέχεια μείωση της ξανά όσο ελαττώνεται το μέγεθος κόκκου. Σημαντικό είναι ότι αυτή η συμπεριφορά δεν μπορεί να διαχωριστεί με κάποιο τρόπο στο παρόν πείραμα από το πάχος του δοκιμίου, το οποίο ακολουθεί φθίνουσα τιμή από το RX-01 μέχρι το RX-07. Αντίστοιχα επηρεάζει το μέγεθος κόκκου της σειράς GG την μαγνητική διαπερατότητα, με τα αποτελέσματα να μην το δείχνουν εμφανώς, καθώς η σειρά GG έχει μικρότερο εύρος μεγέθους κόκκου στα δοκίμια της. Επίσης στη σειρά GG εμφανίζεται μέγιστο στη διαπερατότητα για μέγεθος κόκκου 57 $\mu$ m, και σταδιακή μείωση της από τα 57 $\mu$ m μέχρι τα 66 $\mu$ m.

Η σειρά TS φαίνεται να εμφανίζει τη μέγιστη μαγνητική διαπερατότητα της στο δοκίμιο TS-06 και τα υπόλοιπα δοκίμια εκατέρωθεν του στην αρίθμηση φαίνεται να ακολουθούν φθίνουσα τιμή διαπερατότητας όσο απομακρύνονται από αυτό. Εξαιρεση αποτελεί το TS-01 στο οποίο φαίνεται ότι παρά το σημαντικά μικρότερο πάχος του δοκιμίου, οι τάσεις που το χαρακτηρίζουν του προσδίδουν μεγαλύτερη διαπερατότητα από το TS-02. Αξίζει να σημειωθεί ότι το δοκίμιο TS-09 έχει υποστεί σημαντική παραμόρφωση και ως εκ τούτου κρίνεται σκόπιμο να μη ληφθεί υπόψη στην παραπάνω παρατήρηση.

Το παρόν πείραμα υπέδειξε ορισμένες συμπεριφορές οι οποίες χάρη στις μαγνητικές ιδιότητες του υαλώδους μεταλλικού πυρήνα μπόρεσαν να τονιστούν και να εμφανιστούν για τον σχετικά μικρό αριθμό δοκιμών. Μια ελαφρά εφελκυστική παραμόρφωση, κοντά στην περιοχή του 7%, δρα θετικά στην μαγνητική διαπερατότητα. Θετικά επιδρά επίσης το μεγαλύτερο μέγεθος κόκκου, κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται και από προηγούμενες μελέτες [23].

Η παρούσα εργασία επιβεβαίωσε αρκετές από τις αναμενόμενες συμπεριφορές των δοκιμών. Όπως αναλύθηκε, η συμπεριφορά της μαγνητικής διαπερατότητας φαίνεται να περιγράφεται με σημαντική ακρίβεια στα πλαίσια του πειράματος,  $R\text{-squared} > 90\%$ , από πολυωνυμική μορφή δεύτερου βαθμού, εξαρτημένη πάντα από τη συχνότητα.

Για την μελλοντική έρευνα προτείνεται η διερεύνηση της συμπεριφοράς χαλύβων ίδιου κράματος και διεργασιών διαμόρφωσης με αυτά του παρόντος πειράματος, και με μεγέθη κόκκου κοντά στα 60  $\mu\text{m}$ , καθώς στην περιοχή αυτή εμφανίστηκαν οι απρόσμενες συμπεριφορές που αναφέρθηκαν παραπάνω. Προτείνεται επίσης κατασκευή μιας μη μαγνητικής μήτρας η οποία θα διευκολύνει την τοποθέτηση του αισθητήρα πάνω στα ακριβώς ίδια σημεία για κάθε δοκίμιο έτσι ώστε ο ερευνητής να μπορεί να εργάζεται με μεγαλύτερη ταχύτητα, ακρίβεια και επαναληψιμότητα στις μετρήσεις του.

## Βιβλιογραφία

- [1] B. D. Cullity και C. D. Graham, Introduction to Magnetic Materials, John Wiley & Sons, 2011.
- [2] A. F. Orchard, Magnetochemistry, Oxford University Press, May 2003.
- [3] R. Jackson, ««John Tyndall and the Early History of Diamagnetism»,» τόμ. Annals of Science, αρ. 72:4, 435-489, , 21 July 2014.
- [4] S. Chikazumi, Physics of ferromagnetism, Oxford University press, 2009.
- [5] S. Kasap, Principles of Electronic Materials and Devices.
- [6] «Wikipedia the Free Encyclopedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available: Wikipedia [https://en.wikipedia.org/wiki/Saturation\\_\(magnetic\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Saturation_(magnetic)).
- [7] D. Jiles, Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, Ames, Iowa, USA: SPRINGER-SCffINCE+BUSINESS MEDIA, B.V., 1991.
- [8] M. Muljadi, P. Sardjono και S. Suprapedi, «Preparation and characterization of 5 wt.% epoxy resin bonded,» *Energy Procedia*, τόμ. 68, αρ. 2nd International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application, ICSEEA 2014, pp. 282 - 287, 1 4 2015.
- [9] S. Zurek, «Encyclopedia Magnetica,» 30 11 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://e-magnetica.pl/magnetic\\_permeability](https://e-magnetica.pl/magnetic_permeability). [Πρόσβαση 16 10 2022].
- [10] Zureks, «Wikipedia The Free Encyclopedia,» 1 2009. [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Saturation\\_\(magnetic\)#/media/File:Permeability\\_of\\_ferromagnet\\_by\\_Zureks.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Saturation_(magnetic)#/media/File:Permeability_of_ferromagnet_by_Zureks.svg). [Πρόσβαση 10 2022].
- [11] I. D. Vagner, B.I.Lembrikov και P.Wyder, Electrodynamics of Magnetoactive Media, Springer, 2004.

- [12] J. García-Martín, J. Gómez-Gil και E. Vázquez-Sánchez, «Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing,» αρ. 11, pp. 2525-2565, 2011.
- [13] H. W. Johnson και M. Graham, High Speed Digital Design: A Handbook of Black Magic, Pearson Education India , 1993.
- [14] «Wikipedia the Free Encyclopedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Skin\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Skin_effect).
- [15] T. B. Malla, «Notes for engineering,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.notesforengineering.com/magnetic-circuit/>. [Πρόσβαση 21 10 2022].
- [16] A. Goldman, Handbook of Modern Ferromagnetic Materials, Boston: Springer Science & Media, 1999.
- [17] S. B. AB, «www.tatasteleurope.com,» Surahammars Bruks AB, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.tatasteleurope.com/engineering/products/electrical-steel>. [Πρόσβαση 1 11 2022].
- [18] «www.hitachi-metals.co.jp,» Hitachi Metals, [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://www.hitachi-metals.co.jp/e/products/infr/en/p0\\_1.html](https://www.hitachi-metals.co.jp/e/products/infr/en/p0_1.html). [Πρόσβαση 2 11 2022].
- [19] «Wikipedia,» Wikipedia the Free Encyclopedia, [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Permeability\\_\(electromagnetism\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Permeability_(electromagnetism)). [Πρόσβαση 1 11 2022].
- [20] P. Pattakos, A. Katsoulas, S. Angelopoulos, A. Ktena, P. Tsarabaris και E. Hristoforou, «Development of an Autonomous Magnetic Permeability Sensor,» *IEEE Transactions on Magnetics*, 2022.
- [21] Μ. Κ. Παπαϊωάννου, «Ανάπτυξη Ηλεκτρονικού Αισθητήρα Επιτήρησης Υγείας Χάλυβα,» Αθήνα, 2020.

- [22] Σ. Αγγελόπουλος, Π. Βουρνά, Α. Κτενά και Ε. Χριστοφόρου, «ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ: ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ,» σε 7ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Αθήνα, 2018.
- [23] Μ. Shiozaki και Υ. Kurosaki, «The effects of grain size on the magnetic properties of nonoriented electrical steel sheets,» *Materials Engineering* , τόμ. 11, αρ. <https://doi.org/10.1007/BF02833752>, p. 37–43 , 1989.

## ❖ Παράρτημα

- Πίνακες μετρήσεων δοκιμών ανά συχνότητα

|   | $V_{in}$        | RX-01            |                | RX-02            |                | RX-03            |                | RX-04            |                |
|---|-----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
|   |                 | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 1 | <b>95,75 mV</b> | 57,5 mV          | 64,375 mV      | 56,875 mV        | 60,625 mV      | 53,75 mV         | 51,25 mV       | 58,125 mV        | 61,875 mV      |
| 2 | <b>170 mV</b>   | 97,5 mV          | 93,125 mV      | 85,625 mV        | 101,25 mV      | 78,125 mV        | 75 mV          | 102,5 mV         | 102,5 mV       |
| 3 | <b>770 mV</b>   | 432 mV           | 427,5 mV       | 492,5 mV         | 422,5 mV       | 380 mV           | 317,5 mV       | 405 mV           | 477,5 mV       |
| 4 | <b>1,737 V</b>  | 875 mV           | 856,25 mV      | 762,5 mV         | 825 mV         | 787,5 mV         | 668,75 mV      | 812 mV           | 906,25 mV      |
| 5 | <b>2 V</b>      | 1,018 V          | 1,012 V        | 906,25 mV        | 1,05 V         | 900 mV           | 875 mV         | 962,5 mV         | 1,115 V        |
| 6 | <b>3 V</b>      | 1,14375 V        | 1,25 V         | 1,093 V          | 1,3625 V       | 1,0375 V         | 1,0375 V       | 1,256 V          | 1,356 V        |
| 7 | <b>3,5 V</b>    | 1,3125 V         | 1,2625 V       | 1,2125 V         | 1,44375 V      | 1,2125 V         | 1,05 V         | 1,475 V          | 1,56875 V      |
| 8 | <b>4 V</b>      | 1,5 V            | 1,475 V        | 1,3125 V         | 1,5125 V       | 1,3625 V         | 1,1125 V       | 1,4625 V         | 1,55 V         |
| 9 | <b>4,5 V</b>    | 1,4625 V         | 1,6 V          | 1,4562 V         | 1,55 V         | 1,475 V          | 1,3125 V       | 1,581 V          | 1,581 V        |

| RX-05            |                | RX-06            |                | RX-07            |                |
|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 55,625 mV        | 62,5 mV        | 52 mV            | 55,625 mV      | 37,5 mV          | 48,125 mV      |
| 98,75 mV         | 118,75 mV      | 105,625 mV       | 86,875 mV      | 75,125 mV        | 71,25 mV       |
| 455 mV           | 477,5 mV       | 470 mV           | 347,5 mV       | 327,5 mV         | 272,5 mV       |
| 806,25 mV        | 762,5 mV       | 843,75 mV        | 725 mV         | 655 mV           | 437 mV         |
| 1,05 V           | 943 mV         | 912,5 mV         | 918,75 mV      | 887,5 mV         | 642,5 mV       |
| 1,3375 V         | 1,1937 V       | 1,2 V            | 1,14375 V      | 1,1375 V         | 781,25 mV      |
| 1,468 V          | 1,26875 V      | 1,418 V          | 1,2375 V       | 1,175 V          | 856,25 mV      |
| 1,50625 V        | 1,44375 V      | 1,5125 V         | 1,3875 V       | 1,29375 V        | 850 mV         |
| 1,625 V          | 1,412 V        | 1,65 V           | 1,4125 V       | 1,36875 V        | 837,5 mV       |

Πίνακας 25 – Σειρά δοκιμών RX, συχνότητα λήψης  $f = 0.1\text{Hz}$

|   | $V_{in}$ | GG-01            |                | GG-02            |                | GG-03            |                |
|---|----------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
|   |          | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 1 | 95,75 mV | 51,25 mV         | 47,5 mV        | 50 mV            | 48,125 mV      | 57,5 mV          | 63,125 mV      |
| 2 | 170 mV   | 97,5 mV          | 90,625 mV      | 113,75 mV        | 88,125 mV      | 133,125 mV       | 125 mV         |
| 3 | 770 mV   | 482,5 mV         | 345 mV         | 457,5 mV         | 395 mV         | 480 mV           | 522,5 mV       |
| 4 | 1,737 V  | 850 mV           | 806,25 mV      | 937,5 mV         | 856,25 mV      | 1,0437 V         | 1,0437 V       |
| 5 | 2 V      | 1,162 V          | 1 V            | 1,6875 V         | 962,5 mV       | 1,125 V          | 1,1875 V       |
| 6 | 3 V      | 1,475 V          | 1,2125 V       | 1,525 V          | 1,3625 V       | 1,525 V          | 1,6 V          |
| 7 | 3,5 V    | 1,6 V            | 1,43125 V      | 1,55 V           | 1,45 V         | 1,556 V          | 1,6875 V       |
| 8 | 4 V      | 1,7 V            | 1,45 V         | 1,625 V          | 1,5375 V       | 1,65 V           | 1,725 V        |
| 9 | 4,5 V    | 1,768 V          | 1,618 V        | 1,768 V          | 1,53125 V      | 1,893 V          | 1,875 V        |

| GG-04            |                | GG-05            |                | GG-06            |                |
|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 48,75 mV         | 45,625 mV      | 27,5 mV          | 32,5 mV        | 55,625 mV        | 55,625 mV      |
| 77,5 mV          | 85,625 mV      | 63,75 mV         | 63,75 mV       | 68,75 mV         | 75 mV          |
| 292,5 mV         | 365 mV         | 277,5 mV         | 300 mV         | 337,5 mV         | 347,5 mV       |
| 712,5 mV         | 743,75 mV      | 556,25 mV        | 606,25 mV      | 605 mV           | 665 mV         |
| 1,0375 V         | 937,5 mV       | 837,5 mV         | 800 mV         | 862,5 mV         | 918,75 mV      |
| 1,2125 V         | 1,275 V        | 1,03125 V        | 993,75 mV      | 1,1 V            | 1,1 V          |
| 1,4 V            | 1,3875 V       | 1,04375 V        | 1,1 V          | 1,05 V           | 1,1315 V       |
| 1,625 V          | 1,5125 V       | 1,24375 V        | 1,24375 V      | 1,25 V           | 1,4125 V       |
| 1,7675 V         | 1,7125 V       | 1,15 V           | 1,2125 V       | 1,2625 V         | 1,325 V        |

Πίνακας 26 – Σειρά δοκιμών GG, συχνότητα λήψης  $f = 0.1\text{Hz}$



|   | $V_{in}$ | TS-01            |                | TS-02            |                | TS-03            |                | TS-04            |                |
|---|----------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
|   |          | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 1 | 95,75 mV | 10,75 mV         | 10,625 mV      | 10,625 mV        | 10,625 mV      | 12,5 mV          | 13,75 mV       | 13,75 mV         | 13,75 mV       |
| 2 | 170 mV   | 30 mV            | 34,75 mV       | 33,75 mV         | 34,5 mV        | 44,75 mV         | 45,75 mV       | 49 mV            | 48 mV          |
| 3 | 770 mV   | 173,75 mV        | 180 mV         | 150 mV           | 162,5 mV       | 222,5 mV         | 207,5 mV       | 228,75 mV        | 212,5 mV       |
| 4 | 1,737 V  | 435 mV           | 397,5 mV       | 355 mV           | 385 mV         | 452,5 mV         | 462,5 mV       | 500 mV           | 497,5 mV       |
| 5 | 2 V      | 650 mV           | 575 mV         | 535 mV           | 567,5 mV       | 617,5 mV         | 635 mV         | 685 mV           | 640 mV         |
| 6 | 3 V      | 800 mV           | 812,5 mV       | 687,5 mV         | 725 mV         | 831,25 mV        | 843,75 mV      | 931,25 mV        | 825 mV         |
| 7 | 3,5 V    | 881 mV           | 862,5 mV       | 650 mV           | 781 mV         | 837,5 mV         | 881,25 mV      | 906,25 mV        | 831,25 mV      |
| 8 | 4 V      | 937,5 mV         | 850 mV         | 837,5 mV         | 818,75 mV      | 900 mV           | 962,5 mV       | 1,025 V          | 968,75 mV      |
| 9 | 4,5 V    | 956,25 mV        | 843,75 mV      | 837,5 mV         | 850 mV         | 943,75 mV        | 993,75 mV      | 1,056 V          | 1 V            |

| TS-05            |                | TS-06            |                | TS-07            |                | TS-08            |                | TS-09            |                |
|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 13,75 mV         | 14,375 mV      | 18,125 mV        | 17,5 mV        | 21 mV            | 21 mV          | 22,5 mV          | 22,25 mV       | 21,25 mV         | 21,25 mV       |
| 42,5 mV          | 45 mV          | 64,375 mV        | 46,25 mV       | 46,875 mV        | 53,125 mV      | 43,125 mV        | 41,875 mV      | 38,75 mV         | 36,25 mV       |
| 225 mV           | 221,5 mV       | 338,75 mV        | 238,75 mV      | 220 mV           | 231,25 mV      | 190 mV           | 188,75 mV      | 170 mV           | 168,75 mV      |
| 477,5 mV         | 487,5 mV       | 632,5 mV         | 510 mV         | 470 mV           | 445 mV         | 405 mV           | 407,5 mV       | 305 mV           | 347,5 mV       |
| 657,5 mV         | 650 mV         | 806,25 mV        | 706,5 mV       | 680 mV           | 675 mV         | 595 mV           | 560 mV         | - mV             | - mV           |
| 887,5 mV         | 862,75 mV      | 1,168 V          | 931,25 mV      | 831,25 mV        | 868,75 mV      | 720 mV           | 710 mV         | 677,5 mV         | 720 mV         |
| 875 mV           | 881,25 mV      | 1,175 V          | 906,25 mV      | 850 mV           | 893,75 mV      | 812,5 mV         | 787,5 mV       | 706,25 mV        | 750 mV         |
| 1,075 V          | 981,25 mV      | 1,24375 V        | 1 V            | 975 mV           | 1,00625 V      | 850 mV           | 837,5 mV       | 756,25 mV        | 806,25 mV      |
| 1,075 V          | 1,05 V         | 1,33125 V        | 975 mV         | 1,0875 V         | 1,0875 V       | 925 mV           | 937,5 mV       | 768,75 mV        | 925 mV         |

Πίνακας 27 – Σειρά δοκιμών TS, συχνότητα λήψης  $f = 0.1\text{Hz}$

- $f = 0.2\text{Hz}$

|   |          | RX-01            |                | RX-02            |                | RX-03            |                |
|---|----------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
|   | $V_{in}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 1 | 95,75 mV | 93,75 mV         | 78,75 mV       | 73,125 mV        | 65,625 mV      | 68,125 mV        | 56,875 mV      |
| 2 | 170 mV   | 150 mV           | 147,5 mV       | 135 mV           | 167,5 mV       | 138,75 mV        | 92,5 mV        |
| 3 | 770 mV   | 750 mV           | 600 mV         | 620 mV           | 707,5 mV       | 567,5 mV         | 505 mV         |
| 4 | 1,737 V  | 1,431 V          | 1,25 V         | 1,25 V           | 1,4 V          | 1,175 V          | 1,0625 V       |
| 5 | 2 V      | 1,68125 V        | 1,518 V        | 1,4875 V         | 1,69375 V      | 1,3875 V         | 1,325 V        |
| 6 | 3 V      | 2,05 V           | 2,262 V        | 1,85 V           | 2 V            | 1,8 V            | 1,6875 V       |
| 7 | 3,5 V    | 2,3625 V         | 2,425 V        | 2,0625 V         | 2,35 V         | 1,8 V            | 1,7 V          |
| 8 | 4 V      | 2,5125 V         | 2,2875 V       | 2,1625 V         | 2,4875 V       | 1,9625 V         | 1,9625 V       |
| 9 | 4,5 V    | 2,55 V           | 2,5 V          | 2,4 V            | 2,625 V        | 1,975 V          | 2 V            |

| RX-04            |                | RX-05            |                | RX-06            |                | RX-07            |                |
|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 83,75 mV         | 98,125 mV      | 93,125 mV        | 80,625 mV      | 83,75 mV         | 72,5 mV        | 65 mV            | 45,6 mV        |
| 140 mV           | 172,5 mV       | 191,25 mV        | 140 mV         | 185 mV           | 155 mV         | 120 mV           | 87,5 mV        |
| 602,5 mV         | 760 mV         | 742,5 mV         | 555 mV         | 730 mV           | 577,5 mV       | 565 mV           | 397,5 mV       |
| 1,456 V          | 1,49375 V      | 1,431 V          | 1,156 V        | 1,425 V          | 1,225 V        | 1,131 V          | 737,5 mV       |
| 1,756 V          | 1,8125 V       | 1,731 V          | 1,5625 V       | 1,725 V          | 1,487 V        | 1,337 V          | 1,056 V        |
| 2,237 V          | 2,1 V          | 2,1125 V         | 1,85 V         | 2,15 V           | 1,937 V        | 1,768 V          | 1,30625 V      |
| 2,1875 V         | 2,45 V         | 2,4 V            | 2,1125 V       | 2,3125 V         | 2,05 V         | 1,95 V           | 1,525 V        |
| 2,2 V            | 2,5875 V       | 2,5875 V         | 2,3625 V       | 2,475 V          | 2,1875 V       | 1,962 V          | 1,625 V        |
| 2,775 V          | 2,75 V         | 2,7125 V         | 2,4125 V       | 2,675 V          | 2,25 V         | 2,15 V           | 1,7 V          |

Πίνακας 28 – Σειρά δοκιμών RX, συχνότητα λήψης  $f = 0.2\text{Hz}$

|   |          | GG-01            |                | GG-02            |                | GG-03            |                |
|---|----------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
|   | $V_{in}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 1 | 95,75 mV | 71,25 mV         | 58,125 mV      | 94,375 mV        | 62,5 mV        | 90,625 mV        | 113,125 mV     |
| 2 | 170 mV   | 160 mV           | 125 mV         | 200 mV           | 145 mV         | 176,25 mV        | 201,25 mV      |
| 3 | 770 mV   | 837,5 mV         | 731,25 mV      | 850 mV           | 712,5 mV       | 837,5 mV         | 918,75 mV      |
| 4 | 1,737 V  | 1,506 V          | 1,381 V        | 1,481 V          | 1,343 V        | 1,493 V          | 1,581 V        |
| 5 | 2 V      | 1,775 V          | 1,6375 V       | 1,7625 V         | 1,5625 V       | 1,70625 V        | 1,906 V        |
| 6 | 3 V      | 2,1625 V         | 1,925 V        | 2,2 V            | 2,062 V        | 2,3 V            | 2,35 V         |
| 7 | 3,5 V    | 2,4125 V         | 2,2625 V       | 2,4625 V         | 2,2 V          | 2,6125 V         | 2,6625 V       |
| 8 | 4 V      | 2,325 V          | 2,375 V        | 2,6 V            | 2,3375 V       | 2,6875 V         | 2,7 V          |
| 9 | 4,5 V    | 2,75 V           | 2,45 V         | 2,7125 V         | 2,4625 V       | 2,85 V           | 2,8875 V       |

| GG-04            |                | GG-05            |                | GG-06            |                |
|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 88,75 mV         | 68,125 mV      | 53,75 mV         | 48,125 mV      | 54,375 mV        | 62,5 mV        |
| 143,75 mV        | 135 mV         | 105 mV           | 92,5 mV        | 115 mV           | 120 mV         |
| 643,75 mV        | 650 mV         | 506,25 mV        | 475 mV         | 570 mV           | 540 mV         |
| 1,462 V          | 1,2 V          | 1,00625 V        | 1,06875 V      | 1,175 V          | 1,131 V        |
| 1,743 V          | 1,6 V          | 1,26875 V        | 1,24375 V      | 1,33125 V        | 1,356 V        |
| 2,1 V            | 2 V            | 1,625 V          | 1,537 V        | 1,825 V          | 1,7875 V       |
| 2,225 V          | 2,225 V        | 1,675 V          | 1,7625 V       | 1,975 V          | 1,925 V        |
| 2,325 V          | 2,325 V        | 1,9 V            | 1,825 V        | 2,175 V          | 2,1125 V       |
| 2,325 V          | 2,5625 V       | 1,8125 V         | 1,95 V         | 2,25 V           | 2,175 V        |

Πίνακας 29 – Σειρά δοκιμών GG, συχνότητα λήψης  $f = 0.2\text{Hz}$

|   |          | TS-01            |                | TS-02            |                | TS-03            |                | TS-04            |                |
|---|----------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
|   | $V_{in}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 1 | 95,75 mV | 11,75 mV         | 12 mV          | 12 mV            | 12 mV          | 15 mV            | 14 mV          | 16 mV            | 15 mV          |
| 2 | 170 mV   | 59,37 mV         | 57,5 mV        | 42,5 mV          | 43,75 mV       | 57,5 mV          | 61,25 mV       | 65,625 mV        | 62,5 mV        |
| 3 | 770 mV   | 370 mV           | 342,5 mV       | 292,5 mV         | 275 mV         | 360 mV           | 378,75 mV      | 382,5 mV         | 377,5 mV       |
| 4 | 1,737 V  | 762,5 mV         | 700 mV         | 620 mV           | 615 mV         | 742,5 mV         | 747,5 mV       | 850 mV           | 781,25 mV      |
| 5 | 2 V      | 981,25 mV        | 900 mV         | 850 mV           | 843,75 mV      | 993,75 mV        | 987,5 mV       | 1,0625 V         | 987,5 mV       |
| 6 | 3 V      | 1,131 V          | 1,1 V          | 981,25 mV        | 993,75 mV      | 1,162 V          | 1,181 V        | 1,25 V           | 1,237 V        |
| 7 | 3,5 V    | 1,325 V          | 1,2125 V       | 1,05 V           | 1,125 V        | 1,3 V            | 1,2375 V       | 1,375 V          | 1,26875 V      |
| 8 | 4 V      | 1,38125 V        | 1,30625 V      | 1,23125 V        | 1,2875 V       | 1,3875 V         | 1,46875 V      | 1,4625 V         | 1,525 V        |
| 9 | 4,5 V    | 1,45 V           | 1,33125 V      | 1,18125 V        | 1,175 V        | 1,4 V            | 1,4125 V       | 1,5125 V         | 1,43125 V      |

| TS-05            |                | TS-06            |                | TS-07            |                | TS-08            |                | TS-09            |                |
|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 17,25 mV         | 15 mV          | 30,5 mV          | 16,75 mV       | 23 mV            | 22,5 mV        | 18 mV            | 17,5 mV        | 20,25 mV         | 19,75 mV       |
| 73,75 mV         | 60 mV          | 117,5 mV         | 72,5 mV        | 71,25 mV         | 71,875 mV      | 57,5 mV          | 52,5 mV        | 56,875 mV        | 58,75 mV       |
| 415 mV           | 392,5 mV       | 582,5 mV         | 412,5 mV       | 385 mV           | 395 mV         | 322,5 mV         | 270 mV         | 330 mV           | 277,5 mV       |
| 843,75 mV        | 800 mV         | 1,125 V          | 887,5 mV       | 723,75 mV        | 825 mV         | 706,25 mV        | 625 mV         | 637 mV           | 632,5 mV       |
| 1,0562 V         | 1 V            | 1,3 V            | 1,0375 V       | 1,04375 V        | 1,05 V         | 918,75 mV        | 931,25 mV      | 887,5 mV         | 950 mV         |
| 1,3 V            | 1,2375 V       | 1,64375 V        | 1,3125 V       | 1,275 V          | 1,31875 V      | 1,1375 V         | 1,0875 V       | 1,15625 V        | 1,0812 V       |
| 1,43125 V        | 1,33125 V      | 1,825 V          | 1,48125 V      | 1,3562 V         | 1,3625 V       | 1,33125 V        | 1,2625 V       | 1,1875 V         | 1,325 V        |
| 1,60625 V        | 1,525 V        | 1,9625 V         | 1,45 V         | 1,65 V           | 1,625 V        | 1,3 V            | 1,23125 V      | 1,18125 V        | 1,3125 V       |
| 1,56875 V        | 1,4875 V       | 2 V              | 1,625 V        | 1,5375 V         | 1,55 V         | 1,3375 V         | 1,33125 V      | 1,325 V          | 1,3 V          |

Πίνακας 30 – Σειρά δοκιμών TS, συχνότητα λήψης  $f = 0.2\text{Hz}$

- $f = 0.5\text{Hz}$

|   |          | RX-01            |                | RX-02            |                | RX-03            |                |
|---|----------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
|   | $V_{in}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 1 | 95,75 mV | 168,75 mV        | 220 mV         | 165,25 mV        | 178,75 mV      | 117,5 mV         | 130 mV         |
| 2 | 170 mV   | 342,5 mV         | 407,5 mV       | 325 mV           | 367,5 mV       | 227,5 mV         | 247,5 mV       |
| 3 | 770 mV   | 1,50625 V        | 1,51875 V      | 1,25625 V        | 1,45 V         | 1,0375 V         | 1,0875 V       |
| 4 | 1,737 V  | 2,65 V           | 2,45 V         | 2,3125 V         | 2,6625 V       | 2,05 V           | 2,0875 V       |
| 5 | 2 V      | 2,85 V           | 2,7 V          | 2,625 V          | 2,875 V        | 2,25 V           | 2,3375 V       |
| 6 | 3 V      | 3,675 V          | 3,65 V         | 3,3625 V         | 3,725 V        | 3,025 V          | 3,1 V          |
| 7 | 3,5 V    | 3,95 V           | 4,025 V        | 3,775 V          | 3,975 V        | 3,5 V            | 3,4375 V       |
| 8 | 4 V      | 4,25 V           | 4 V            | 4,05 V           | 4,225 V        | 3,575 V          | 3,675 V        |
| 9 | 4,5 V    | 4,525 V          | 4,225 V        | 4,4 V            | 4,575 V        | 3,75 V           | 3,9 V          |

| RX-04            |                | RX-05            |                | RX-06            |                | RX-07            |                |
|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 172,5 mV         | 215 mV         | 181,25 mV        | 152,5 mV       | 247,5 mV         | 150 mV         | 160 mV           | 76,25 mV       |
| 322,5 mV         | 435 mV         | 367,5 mV         | 325 mV         | 445 mV           | 325 mV         | 320 mV           | 158,75 mV      |
| 1,34375 V        | 1,475 V        | 1,39375 V        | 1,35 V         | 1,325 V          | 1,1 V          | 1,1625 V         | 737,5 mV       |
| 2,65 V           | 2,6875 V       | 2,3125 V         | 2,4 V          | 2,55 V           | 2,2875 V       | 2,125 V          | 1,5875 V       |
| 2,825 V          | 2,8875 V       | 2,775 V          | 2,65 V         | 2,725 V          | 2,5125 V       | 2,3 V            | 1,75 V         |
| 3,4875 V         | 3,7 V          | 3,525 V          | 3,4875 V       | 3,1375 V         | 3,225 V        | 3 V              | 2,4125 V       |
| 4 V              | 4 V            | 3,8 V            | 3,85 V         | 3,85 V           | 3,525 V        | 3,275 V          | 2,4375 V       |
| 4,3 V            | 4,325 V        | 4,15 V           | 3,975 V        | 4,05 V           | 3,725 V        | 3,5375 V         | 2,8125 V       |
| 4,375 V          | 4,425 V        | 4,25 V           | 4,3 V          | 4,425 V          | 4,05 V         | 3,9 V            | 2,825 V        |

Πίνακας 31 – Σειρά δοκιμών RX, συχνότητα λήψης  $f = 0.5\text{Hz}$

|   | $V_{in}$ | GG-01            |                | GG-02            |                | GG-03            |                |
|---|----------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
|   |          | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 1 | 95,75 mV | 146,25 mV        | 130 mV         | 230 mV           | 151,25 mV      | 207,5 mV         | 237,5 mV       |
| 2 | 170 mV   | 350 mV           | 322,5 mV       | 415 mV           | 320 mV         | 412,5 mV         | 462,5 mV       |
| 3 | 770 mV   | 1,55 V           | 1,425 V        | 1,5375 V         | 1,4 V          | 1,575 V          | 1,7125 V       |
| 4 | 1,737 V  | 2,65 V           | 2,525 V        | 2,775 V          | 2,5 V          | 2,85 V           | 2,85 V         |
| 5 | 2 V      | 2,975 V          | 2,9 V          | 3,115 V          | 2,725 V        | 3,2 V            | 3,25 V         |
| 6 | 3 V      | 3,9 V            | 3,6 V          | 3,975 V          | 3,675 V        | 4,05 V           | 4 V            |
| 7 | 3,5 V    | 4,25 V           | 3,975 V        | 4,325 V          | 3,85 V         | 4,225 V          | 4,225 V        |
| 8 | 4 V      | 4,45 V           | 4,175 V        | 4,525 V          | 4,3 V          | 4,45 V           | 4,575 V        |
| 9 | 4,5 V    | 4,85 V           | 4,55 V         | 4,775 V          | 4,45 V         | 4,625 V          | 4,8 V          |

| GG-04            |                | GG-05            |                | GG-06            |                |
|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 87,5 mV          | 160 mV         | 102,5 mV         | 122,5 mV       | 122,5 mV         | 136,25 mV      |
| 260 mV           | 285 mV         | 200 mV           | 240 mV         | 300 mV           | 255 mV         |
| 1,4 V            | 1,275 V        | 975 mV           | 1,0625 V       | 1,2375 V         | 1,2125 V       |
| 2,4875 V         | 2,475 V        | 1,8875 V         | 2,0375 V       | 2,25 V           | 2,25 V         |
| 2,725 V          | 3 V            | 2,025 V          | 2,2375 V       | 2,625 V          | 2,5 V          |
| 3,6 V            | 3,775 V        | 2,75 V           | 3,05 V         | 3,35 V           | 3,275 V        |
| 4,05 V           | 3,95 V         | 3,2 V            | 3,3875 V       | 3,75 V           | 3,55 V         |
| 4,3 V            | 4,325 V        | 3,45 V           | 3,55 V         | 4,025 V          | 3,8 V          |
| 4,475 V          | 4,525 V        | 3,5 V            | 3,775 V        | 4,175 V          | 4,1 V          |

Πίνακας 32 – Σειρά δοκιμών GG, συχνότητα λήψης  $f = 0.5\text{Hz}$

|   | $V_{in}$        | TS-01            |                | TS-02            |                | TS-03            |                | TS-04            |                |
|---|-----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
|   |                 | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 1 | <b>95,75 mV</b> | 29,5 mV          | 29,5 mV        | 23 mV            | 23 mV          | 30 mV            | 29,5 mV        | 37 mV            | 36,5 mV        |
| 2 | <b>170 mV</b>   | 145 mV           | 106,875 mV     | 86,25 mV         | 82,5 mV        | 121,25 mV        | 127,5 mV       | 142,5 mV         | 127,5 mV       |
| 3 | <b>770 mV</b>   | 750 mV           | 700 mV         | 590 mV           | 607,5 mV       | 735 mV           | 740 mV         | 825 mV           | 775 mV         |
| 4 | <b>1,737 V</b>  | 1,39375 V        | 1,2625 V       | 1,2 V            | 1,1875 V       | 1,4375 V         | 1,4375 V       | 1,575 V          | 1,46875 V      |
| 5 | <b>2 V</b>      | 1,65 V           | 1,55 V         | 1,44375 V        | 1,425 V        | 1,7 V            | 1,68125 V      | 1,8625 V         | 1,775 V        |
| 6 | <b>3 V</b>      | 2,175 V          | 2,075 V        | 1,925 V          | 1,9125 V       | 2,2 V            | 2,2 V          | 2,475 V          | 2,3125 V       |
| 7 | <b>3,5 V</b>    | 2,35 V           | 2,4125 V       | 2,125 V          | 2,125 V        | 2,475 V          | 2,475 V        | 2,6625 V         | 2,525 V        |
| 8 | <b>4 V</b>      | 2,5125 V         | 2,325 V        | 2,225 V          | 2,2375 V       | 2,6 V            | 2,55 V         | 2,8125 V         | 2,6 V          |
| 9 | <b>4,5 V</b>    | 2,6875 V         | 2,5 V          | 2,375 V          | 2,35 V         | 2,7125 V         | 2,7125 V       | 2,95 V           | 2,8875 V       |

| TS-05            |                | TS-06            |                | TS-07            |                | TS-08            |                | TS-09            |                |
|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 42,5 mV          | 32,5 mV        | 63,75 mV         | 47,5 mV        | 44 mV            | 46,75 mV       | 41,5 mV          | 44,5 mV        | 47,5 mV          | 51,25 mV       |
| 152,5 mV         | 125 mV         | 262,5 mV         | 166,25 mV      | 146,25 mV        | 157,5 mV       | 128,75 mV        | 122,5 mV       | 135 mV           | 133,75 mV      |
| 843,75 mV        | 800 mV         | 1,1 V            | 881,25 mV      | 830 mV           | 831,25 mV      | 637,5 mV         | 643,75 mV      | 650 mV           | 675 mV         |
| 1,625 V          | 1,525 V        | 1,95 V           | 1,6375 V       | 1,64375 V        | 1,625 V        | 1,45 V           | 1,38125 V      | 1,3625 V         | 1,3875 V       |
| 1,85 V           | 1,83125 V      | 2,25 V           | 1,95 V         | 1,925 V          | 1,9875 V       | 1,775 V          | 1,675 V        | 1,7 V            | 1,7125 V       |
| 2,4875 V         | 2,4 V          | 2,9 V            | 2,52125 V      | 2,525 V          | 2,525 V        | 2,3125 V         | 2,1875 V       | 2,2625 V         | 2,275 V        |
| 2,6875 V         | 2,5875 V       | 3,225 V          | 2,7125 V       | 2,8 V            | 2,75 V         | 2,575 V          | 2,4375 V       | 2,4125 V         | 2,5125 V       |
| 2,8875 V         | 2,725 V        | 3,425 V          | 2,875 V        | 2,9625 V         | 2,9125 V       | 2,7 V            | 2,6375 V       | 2,7625 V         | 2,7 V          |
| 3,0375 V         | 2,8625 V       | 3,55 V           | 2,925 V        | 3,025 V          | 3,025 V        | 2,8625 V         | 2,7125 V       | 2,8 V            | 2,825 V        |

Πίνακας 33 – Σειρά δοκιμών TS, συχνότητα λήψης  $f = 0.5\text{Hz}$

- $f = 1\text{Hz}$

|   |          | RX-01            |                | RX-02            |                | RX-03            |                |
|---|----------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
|   | $V_{in}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 1 | 95,75 mV | 345 mV           | 415 mV         | 285 mV           | 352,5 mV       | 227,5 mV         | 240 mV         |
| 2 | 170 mV   | 667,5 mV         | 705 mV         | 542,5 mV         | 652,5 mV       | 455 mV           | 470 mV         |
| 3 | 770 mV   | 2,275 V          | 2,4 V          | 2,2625 V         | 2,35 V         | 1,85 V           | 1,8875 V       |
| 4 | 1,737 V  | 3,975 V          | 3,85 V         | 3,85 V           | 3,925 V        | 3,2 V            | 3,325 V        |
| 5 | 2 V      | 4,3 V            | 4,275 V        | 4,175 V          | 4,3 V          | 3,675 V          | 3,775 V        |
| 6 | 3 V      | 5,6 V            | 5,55 V         | 5,375 V          | 5,575 V        | 4,725 V          | 4,975 V        |
| 7 | 3,5 V    | 5,975 V          | 6,05 V         | 5,675 V          | 5,85 V         | 5,375 V          | 5,225 V        |
| 8 | 4 V      | 6,15 V           | 6,4 V          | 6,225 V          | 6,3 V          | 5,575 V          | 5,7 V          |
| 9 | 4,5 V    | 6,925 V          | 6,9 V          | 6,575 V          | 6,775 V        | 5,925 V          | 6 V            |

| RX-04            |                | RX-05            |                | RX-06            |                | RX-07            |                |
|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 340 mV           | 420 mV         | 320 mV           | 278,75 mV      | 321,25 mV        | 306,25 mV      | 285 mV           | 160 mV         |
| 517,5 mV         | 735 mV         | 612,5 mV         | 680 mV         | 677,5 mV         | 595 mV         | 555 mV           | 300 mV         |
| 2,3375 V         | 2,3875 V       | 2,25 V           | 2,25 V         | 2,2 V            | 2 V            | 1,88125 V        | 1,425 V        |
| 3,7 V            | 3,975 V        | 3,7875 V         | 3,7875 V       | 3,5875 V         | 3,4125 V       | 3,275 V          | 2,4875 V       |
| 4 V              | 4,375 V        | 4,15 V           | 4,1 V          | 4 V              | 3,775 V        | 3,625 V          | 2,8 V          |
| 5,575 V          | 5,525 V        | 5,425 V          | 5,375 V        | 5,35 V           | 4,9 V          | 4,625 V          | 3,7625 V       |
| 6,1 V            | 5,9 V          | 5,625 V          | 5,575 V        | 5,5 V            | 5,025 V        | 5,025 mV         | 4,075 V        |
| 6,6 V            | 6,35 V         | 6,05 V           | 6,125 V        | 6,075 V          | 5,6 V          | 5,5 mV           | 4,525 V        |
| 6,925 V          | 6,8 V          | 6,6 V            | 6,45 V         | 6,45 V           | 6,1 V          | 5,925 mV         | 4,95 V         |

Πίνακας 34 – Σειρά δοκιμών RX, συχνότητα λήψης  $f = 1\text{Hz}$



|   | $V_{in}$        | GG-01            |                | GG-02            |                | GG-03            |                |
|---|-----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
|   |                 | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 1 | <b>95,75 mV</b> | 287,5 mV         | 276,25 mV      | 371,25 mV        | 277,5 mV       | 331,25 mV        | 440 mV         |
| 2 | <b>170 mV</b>   | 645 mV           | 597,5 mV       | 745 mV           | 590 mV         | 692,5 mV         | 800 mV         |
| 3 | <b>770 mV</b>   | 2,4125 V         | 2,2375 V       | 2,5375 V         | 2,2125 V       | 2,4875 V         | 2,6 V          |
| 4 | <b>1,737 V</b>  | 4,05 V           | 3,85 V         | 4,175 V          | 3,85 V         | 4,025 V          | 4,25 V         |
| 5 | <b>2 V</b>      | 4,575 V          | 4,325 V        | 4,6 V            | 4,3 V          | 4,675 V          | 4,825 V        |
| 6 | <b>3 V</b>      | 5,875 V          | 5,575 V        | 5,875 V          | 5,575 V        | 5,95 V           | 6 V            |
| 7 | <b>3,5 V</b>    | 6,3 V            | 5,875 V        | 6,375 V          | 5,875 V        | 6,25 V           | 6,35 V         |
| 8 | <b>4 V</b>      | 6,775 V          | 6,375 V        | 6,775 V          | 6,375 V        | 6,7 V            | 6,725 V        |
| 9 | <b>4,5 V</b>    | 7,225 V          | 6,8 V          | 7,275 V          | 6,925 V        | 7,55 V           | 7,6 V          |

| GG-04            |                | GG-05            |                | GG-06            |                |
|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 215 mV           | 272,5 mV       | 192,5 mV         | 222,5 mV       | 258,75 mV        | 235 mV         |
| 532,5 mV         | 580 mV         | 400 mV           | 462,5 mV       | 537,5 mV         | 500 mV         |
| 2,125 V          | 2,2375 V       | 1,61875 V        | 1,84375 V      | 1,9125 V         | 1,975 V        |
| 3,85 V           | 3,875 V        | 3,1375 V         | 3,25 V         | 3,425 V          | 3,575 V        |
| 4,175 V          | 4,225 V        | 3,625 V          | 3,825 V        | 4,15 V           | 4 V            |
| 5,425 V          | 5,425 V        | 4,525 V          | 4,9 V          | 5,3 V            | 5,275 V        |
| 5,975 V          | 5,95 V         | 5,05 V           | 5,25 V         | 5,6 V            | 5,575 V        |
| 6,35 V           | 6,45 V         | 5,6 V            | 5,65 V         | 6,15 V           | 5,925 V        |
| 7,125 V          | 7,3 V          | 6,05 V           | 6,3 V          | 6,525 V          | 6,475 V        |

Πίνακας 35 – Σειρά δοκιμών GG, συχνότητα λήψης  $f = 1\text{Hz}$

|   |                 | TS-01            |                | TS-02            |                | TS-03            |                | TS-04            |                |
|---|-----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
|   | $V_{in}$        | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 1 | <b>95,75 mV</b> | 52,25 mV         | 42 mV          | 38 mV            | 36,5 mV        | 41,5 mV          | 52,25 mV       | 57 mV            | 52 mV          |
| 2 | <b>170 mV</b>   | 251,25 mV        | 235 mV         | 148,75 mV        | 162,5 mV       | 215 mV           | 245 mV         | 273,75 mV        | 232,5 mV       |
| 3 | <b>770 mV</b>   | 1,21875 V        | 1,2 V          | 1,05 V           | 1,075 V        | 1,2625 V         | 1,275 V        | 1,4125 V         | 1,3375 V       |
| 4 | <b>1,737 V</b>  | 2,2375 V         | 2,2125 V       | 2,0375 V         | 2,05 V         | 2,35 V           | 2,3625 V       | 2,5375 V         | 2,425 V        |
| 5 | <b>2 V</b>      | 2,5875 V         | 2,55 V         | 2,35 V           | 2,3875 V       | 2,725 V          | 2,725 V        | 2,9625 V         | 2,8375 V       |
| 6 | <b>3 V</b>      | 3,4 V            | 3,3875 V       | 3,0875 V         | 3,15 V         | 3,6125 V         | 3,5875 V       | 3,925 V          | 3,775 V        |
| 7 | <b>3,5 V</b>    | 3,75 V           | 3,75 V         | 3,35 V           | 3,4625 V       | 3,85 V           | 3,975 V        | 4,175 V          | 3,975 V        |
| 8 | <b>4 V</b>      | 4,25 V           | 4,225 V        | 3,925 V          | 4 V            | 4,325 V          | 4,325 V        | 4,675 V          | 4,45 V         |
| 9 | <b>4,5 V</b>    | 4,375 V          | 4,325 V        | 4,05 V           | 4,075 V        | 4,525 V          | 4,575 V        | 4,925 V          | 4,575 V        |

| TS-05            |                | TS-06            |                | TS-07            |                | TS-08            |                | TS-09            |                |
|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 59,5 mV          | 55 mV          | 124,375 mV       | 74,375 mV      | 76,875 mV        | 76,875 mV      | 73,75 mV         | 63,25 mV       | 66,5 mV          | 85 mV          |
| 270 mV           | 230 mV         | 422,5 mV         | 287,5 mV       | 282,5 mV         | 295 mV         | 237,5 mV         | 226,25 mV      | 245 mV           | 268,75 mV      |
| 1,4125 V         | 1,36875 V      | 1,8 V            | 1,4625 V       | 1,4625 V         | 1,48125 V      | 1,29375 V        | 1,225 V        | 1,28125 V        | 1,275 V        |
| 2,6875 V         | 2,4875 V       | 3,1375 V         | 2,6875 V       | 2,7125 V         | 2,7625 V       | 2,5125 V         | 2,3625 V       | 2,3875 V         | 2,6 V          |
| 3 V              | 2,8 V          | 3,5875 V         | 3,025 V        | 3,125 V          | 3,2 V          | 2,9 V            | 2,7875 V       | 2,8375 V         | 3 V            |
| 4 V              | 3,85 V         | 4,775 V          | 4,05 V         | 4,275 V          | 4,1 V          | 3,875 V          | 3,775 V        | 3,775 V          | 3,85 V         |
| 4,35 V           | 4,05 V         | 5,05 V           | 4,35 V         | 4,475 V          | 4,475 V        | 4,175 V          | 4 V            | 4,1 V            | 4,375 V        |
| 4,85 V           | 4,525 V        | 5,475 V          | 4,675 V        | 4,95 V           | 4,95 V         | 4,625 V          | 4,375 V        | 4,475 V          | 4,7 V          |
| 5,375 V          | 5,05 V         | 6,05 V           | 5,275 V        | 5,475 V          | 5,375 V        | 5 V              | 4,875 V        | 4,85 V           | 4,875 V        |

Πίνακας 36 – Σειρά δοκιμών TS, συχνότητα λήψης  $f = 1\text{Hz}$

- $f = 2\text{Hz}$

|   |                 | RX-01            |                | RX-02            |                | RX-03            |                |
|---|-----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
|   | $V_{in}$        | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 1 | <b>95,75 mV</b> | 590 mV           | 610 mV         | 525 mV           | 597,5 mV       | 405 mV           | 43,75 mV       |
| 2 | <b>170 mV</b>   | 1,01875 V        | 1,1375 V       | 1,1125 V         | 1,1 V          | 806,25 mV        | 856,25 mV      |
| 3 | <b>770 mV</b>   | 3,4125 V         | 3,4625 V       | 3,3625 V         | 3,375 V        | 2,85 V           | 2,9875 V       |
| 4 | <b>1,737 V</b>  | 5,925 V          | 5,875 V        | 5,725 V          | 5,8 V          | 5,175 V          | 5,225 V        |
| 5 | <b>2 V</b>      | 6,225 V          | 6,225 V        | 6,025 V          | 6,2 V          | 5,6 V            | 5,5 V          |
| 6 | <b>3 V</b>      | 7,75 V           | 7,625 V        | 7,6875 V         | 7,75 V         | 7 V              | 7,1 V          |
| 7 | <b>3,5 V</b>    | 8,25 V           | 8,0625 V       | 8,25 V           | 8,3125 V       | 7,5 V            | 7,5625 V       |
| 8 | <b>4 V</b>      | 9,3125 V         | 9,3125 V       | 9 V              | 9,1875 V       | 8,375 V          | 8,3125 V       |
| 9 | <b>4,5 V</b>    | 10,625 V         | 10,5625 V      | 10,375 V         | 10,4375 V      | 9,625 V          | 9,6875 V       |

| RX-04            |                | RX-05            |                | RX-06            |                | RX-07            |                |
|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 635 mV           | 650 mV         | 582,5 mV         | 537,5 mV       | 627,5 mV         | 522,5 mV       | 505 mV           | 242,5 mV       |
| 1,125 V          | 1,21875 V      | 1,075 V          | 1,0125 V       | 1,13125 V        | 962,5 mV       | 950 mV           | 595 mV         |
| 3,55 V           | 3,5125 V       | 3,375 V          | 3,3 V          | 3,2625 V         | 3,075 V        | 2,85 V           | 2,2125 V       |
| 5,925 V          | 5,9 V          | 5,65 V           | 5,65 V         | 5,5 V            | 5,225 V        | 4,925 V          | 3,925 V        |
| 6,2 V            | 6,125 V        | 5,95 V           | 5,95 V         | 5,95 V           | 5,325 V        | 5,35 V           | 4,225 V        |
| 7,8125 V         | 7,6 V          | 7,55 V           | 7,475 V        | 7,425 V          | 6,875 V        | 6,675 V          | 5,5 V          |
| 8,5 V            | 8,25 V         | 8,0625 V         | 8 V            | 8 V              | 7,6 V          | 7,4 V            | 5,925 V        |
| 9,1875 V         | 9 V            | 8,75 V           | 8,625 V        | 8,5 V            | 7,875 V        | 7,8125 V         | 6,375 V        |
| 10,5 V           | 10,1875 V      | 10,0625 V        | 9,8125 V       | 10 V             | 9,3125 V       | 9 V              | 7,45 V         |

Πίνακας 37 – Σειρά δοκιμών RX, συχνότητα λήψης  $f = 2\text{Hz}$

|   |          | GG-01            |                | GG-02            |                | GG-03            |                |
|---|----------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
|   | $V_{in}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 1 | 95,75 mV | 485 mV           | 402,5 mV       | 572,5 mV         | 432,5 mV       | 675 mV           | 680 mV         |
| 2 | 170 mV   | 1,1 V            | 981,25 mV      | 1,2 V            | 975 mV         | 1,30625 V        | 1,31875 V      |
| 3 | 770 mV   | 3,6375 V         | 3,4875 V       | 3,7625 V         | 3,4375 V       | 3,75 V           | 3,775 V        |
| 4 | 1,737 V  | 6,05 V           | 5,5 V          | 6,325 V          | 5,9 V          | 6,35 V           | 6,35 V         |
| 5 | 2 V      | 6,575 V          | 6,375 V        | 6,775 V          | 6,35 V         | 6,775 V          | 6,725 V        |
| 6 | 3 V      | 8,25 V           | 7,875 V        | 8,375 V          | 7,875 V        | 8,5 V            | 8,25 V         |
| 7 | 3,5 V    | 8,9375 V         | 8,625 V        | 9,3125 V         | 8,75 V         | 9,375 V          | 9,125 V        |
| 8 | 4 V      | 9,6875 V         | 9,375 V        | 10 V             | 9,375 V        | 10 V             | 9,875 V        |
| 9 | 4,5 V    | 11,5 V           | 10,6875 V      | 11,6875 V        | 10,9375 V      | 11,5625 V        | 11,3125 V      |

| GG-04            |                | GG-05            |                | GG-06            |                |
|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 475 mV           | 480 mV         | 342,5 mV         | 350 mV         | 437,5 mV         | 410 mV         |
| 950 mV           | 937,5 mV       | 731,25 mV        | 806,25 mV      | 950 mV           | 843,75 mV      |
| 3,2875 V         | 3,0625 V       | 2,7625 V         | 2,9625 V       | 3,2125 V         | 3,175 V        |
| 5,725 V          | 5,775 V        | 4,95 V           | 4,45 V         | 5,725 V          | 5,575 V        |
| 6,225 V          | 6,15 V         | 5,4 V            | 5,575 V        | 6 V              | 5,95 V         |
| 7,9375 V         | 8,1875 V       | 7 V              | 7,125 V        | 7,6 V            | 7,575 V        |
| 8,4375 V         | 8,5625 V       | 7,75 V           | 7,8125 V       | 8,1875 V         | 8,1875 V       |
| 9,6875 V         | 9,625 V        | 8,4375 V         | 8,5625 V       | 8,9375 V         | 8,8125 V       |
| 10,8125 V        | 10,6875 V      | 9,3125 V         | 9,6875 V       | 10,5625 V        | 10 V           |

Πίνακας 38 – Σειρά δοκιμών GG, συχνότητα λήψης  $f = 2\text{Hz}$

|   |                 | TS-01            |                | TS-02            |                | TS-03            |                | TS-04            |                |
|---|-----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
|   | $V_{in}$        | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 1 | <b>95,75 mV</b> | 78,75 mV         | 78,125 mV      | 67 mV            | 68,75 mV       | 83,75 mV         | 91,25 mV       | 132,5 mV         | 102,5 mV       |
| 2 | <b>170 mV</b>   | 432,5 mV         | 412,5 mV       | 270 mV           | 275 mV         | 390 mV           | 397,5 mV       | 467,5 mV         | 395 mV         |
| 3 | <b>770 mV</b>   | 1,9375 V         | 1,975 V        | 1,7375 V         | 1,75 V         | 2,0375 V         | 2,0625 V       | 2,25 V           | 2,1375 V       |
| 4 | <b>1,737 V</b>  | 3,625 V          | 3,6 V          | 3,325 V          | 3,375 V        | 3,8 V            | 3,825 V        | 4,15 V           | 3,925 V        |
| 5 | <b>2 V</b>      | 4 V              | 3,975 V        | 3,7 V            | 3,65 V         | 4,15 V           | 4,225 V        | 4,6 V            | 4,325 V        |
| 6 | <b>3 V</b>      | 5,15 V           | 4,925 V        | 4,75 V           | 4,675 V        | 5,45 V           | 5,35 V         | 5,85 V           | 5,475 V        |
| 7 | <b>3,5 V</b>    | 5,5 V            | 5,4 V          | 5,25 V           | 5,2 V          | 6,025 V          | 5,875 V        | 6,475 V          | 6,025 V        |
| 8 | <b>4 V</b>      | 6,225 V          | 6,15 V         | 6,05 V           | 5,925 V        | 6,75 V           | 6,8 V          | 7,525 V          | 7 V            |
| 9 | <b>4,5 V</b>    | 7,275 V          | 7,2 V          | 6,95 V           | 6,85 V         | 7,875 V          | 7,8125 V       | 8,375 V          | 7,8125 V       |

| TS-05            |                | TS-06            |                | TS-07            |                | TS-08            |                | TS-09            |                |
|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ | $V_{out-Center}$ | $V_{out-edge}$ |
| 110 mV           | 103,125 mV     | 230 mV           | 122,5 mV       | 141,875 mV       | 153,125 mV     | 119,375 mV       | 112,5 mV       | 163,75 mV        | 195 mV         |
| 452,5 mV         | 417,5 mV       | 692,5 mV         | 522,5 mV       | 500 mV           | 515 mV         | 387,5 mV         | 407,5 mV       | 415,5 mV         | 480 mV         |
| 2,2875 V         | 2,1875 V       | 2,725 V          | 2,425 V        | 2,4 V            | 2,425 V        | 2,175 V          | 2,075 V        | 2,1125 V         | 2,175 V        |
| 4,225 V          | 4,1 V          | 4,925 V          | 4,225 V        | 4,55 V           | 4,5 V          | 4,25 V           | 4 V            | 4,2 V            | 4,275 V        |
| 4,675 V          | 4,475 V        | 5,275 V          | 4,675 V        | 4,9 V            | 4,8 V          | 4,65 V           | 4,4 V          | 4,625 V          | 4,675 V        |
| 6,075 V          | 5,725 V        | 6,875 V          | 6,075 V        | 6,45 V           | 6,375 V        | 6,075 V          | 5,8 V          | 5,925 V          | 6,15 V         |
| 6,725 V          | 6,325 V        | 7,5 V            | 6,5 V          | 7,125 V          | 7 V            | 6,75 V           | 6,4 V          | 6,425 V          | 6,625 V        |
| 7,5 V            | 7,2 V          | 8,4375 V         | 7,375 V        | 7,9375 V         | 7,775 V        | 7,4375 V         | 6,9375 V       | 7,3 V            | 7,425 V        |
| 9 V              | 8,4375 V       | 10 V             | 8,625 V        | 9,375 V          | 9,125 V        | 8,875 V          | 8,375 V        | 8,875 V          | 8,8125 V       |

Πίνακας 39 – Σειρά δοκιμών TS, συχνότητα λήψης  $f = 2\text{Hz}$