



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

**ΜΕΛΕΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ  
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΜΕ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Σαρηγιαννίδης Σάββας**

Επιβλέπων Καθηγητής:

**Τσουκαλάς Δημήτριος**

Αθήνα, 2021

Η ΣΕΛΙΔΑ ΑΥΤΗ ΜΕΝΕΙ ΕΝ ΓΝΩΣΕΙ ΚΕΝΗ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

**ΜΕΛΕΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ  
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΜΕ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Σαρηγιαννίδης Σάββας**

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις \_ / \_ /2021

Κυρίτσης Απόστολος

Ράπτης Ιωάννης

Τσουκαλάς Δημήτριος

Αθήνα, 2021

Σάββας Σαρηγιαννίδης

Διπλωματούχος Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών Ε.Μ.Π.

© (2021) Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. All rights Reserved. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σ' αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Δημήτριο Τσουκαλά για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον ερευνητικό θέμα και για τις πολύτιμες συμβουλές που μου χάρισε. Ακόμα θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον μεταδιδακτορικό Ευάγγελο Ασλανίδη για την απεριόριστη βοήθεια και καθοδήγηση του κατά το χρονικό διάστημα της διπλωματικής. Επιπλέον ευχαριστώ την ομάδα των μεταπτυχιακών φοιτητών του τομέα φυσικής του ΕΜΠ για το εξαιρετικά φιλόξενο περιβάλλον που δημιούργησαν και τη βοήθεια που μου παρείχαν.

Τέλος, είμαι εντελώς ευγνώμων προς τους φίλους και την οικογένεια μου, που με στήριξαν και συνεχίζουν να με στηρίζουν στην πορεία μου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάπτυξη αισθητήριων μονάδων είναι καίριας σημασίας για την ομαλή εξέλιξη της τεχνολογίας και της επιστήμης. Καταστάσεις που απαιτούν τη γνώση της παραμόρφωσης ενός αντικειμένου ωθούν στην κατασκευή αισθητήρων που μπορούν να αντιληφθούν τέτοιες μεταβολές όσο πιο αξιόπιστα γίνεται. Για το λόγο αυτό κατασκευάζονται αισθητήρες που έχουν ως αισθητήριο μηχανισμό μεταλλικά νανοσωματίδια πάνω σε εύκαμπτα υποστρώματα. Η λειτουργία τους έγκειται στην εκμετάλλευση της έντονης εξάρτησης της ηλεκτρικής αντίστασης από την μεταξύ απόσταση των νανοσωματιδίων. Η ευαισθησία τέτοιου είδους αισθητήρων είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή που παρουσιάζουν οι αντίστοιχοι εμπορικά διαθέσιμοι μεταλλικοί και ξεπερνούν, σε ορισμένες περιπτώσεις, αυτή των ημιαγωγικών. Ταυτόχρονα, οι μέγιστες παραμορφώσεις που μπορούν να αντέξουν είναι πολύ υψηλές. Στην εργασία αυτή ερευνάται η χρήση αισθητήρων, κατασκευασμένων από νανοσωματίδια πλατίνας εναποτεθειμένων σε εύκαμπτο υπόστρωμα πολυϊμιδίου, για την ανίχνευση δονήσεων. Η κατασκευή αυτών των μονάδων έγινε με χρήση συστημάτων εναπόθεσης υλικού υπό κενό οι οποίες δύναται να εναποθέσουν πολύ λεπτά στρώματα υλικού ή και νανοσωματιδίων πάνω σε υπόστρωμα. Οι δοκιμές έγιναν με χρήση ταλαντωτή, που κατασκευάστηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας, και σε ένα ακουστικό ηχείο. Για την καταγραφή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ένας ψηφιακός παλμογράφος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μπορούν να ανιχνευτούν αξιόπιστα συχνότητες από 0Hz έως 4000Hz. Επιπλέον, ήταν δυνατόν να αναγνωριστούν ταυτόχρονες πολλαπλές συχνότητες, με το πιο αξιοσημείωτο αποτέλεσμα την καταγραφή μουσικής.

## **ABSTRACT**

The development of sensors is of utmost importance for the smooth progress of technology and science. Situations, which demand the knowledge of the strain of an object, push for the creation of sensors that can detect such changes as reliably as possible. For that reason sensors which are based on metal nanoparticles on flexible substrates, are manufactured. Their operation lies on the exploitation of the exponential dependence of the electrical resistance from the distance of the nanoparticles. The sensitivity of such sensors is much greater than that of commercially available metal meander sensors and in some cases even surpass the sensitivity of semiconductor ones. At the same time, the maximum strain that they can withstand is very high. In this thesis, the usage of strain sensors, made of platinum nanoparticles deposited on top of a polyimide film, as vibrational sensors, is researched. The fabrication of these units was made possible using machines that can deposit thin films of material, and/or nanoparticles on a substrate under vacuum conditions. The tests were conducted using an oscillator, which was manufactured specifically for this thesis, a loudspeaker and a digital oscilloscope for the recording of the measurements. Results showed that frequencies in the range of 0Hz up to 4000Hz can be reliably detected. Furthermore, it was possible to detect simultaneously multiple frequencies, the most remarkable result being the recording of music.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iii
ABSTRACT.....	iv
1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ .....	1
1.1 Γενικά στοιχεία .....	1
1.2 Κατηγοριοποίηση αισθητήρων.....	3
1.3 Στατικά χαρακτηριστικά.....	3
1.4 Δυναμικά χαρακτηριστικά .....	6
2. ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.....	8
2.1 Γενικά χαρακτηριστικά.....	8
2.2 Εφαρμογές.....	8
2.3 Μηχανισμός αγωγιμότητας .....	9
2.4 Πολυϊμίδιο Kapton.....	11
2.5 Στρώμα Αλουμίνας .....	12
2.6 Παραμόρφωση του αισθητήρα.....	12
2.7 Μετρητικός παράγοντας.....	15
2.8 Μέθοδοι Κατασκευής Αισθητήρων.....	17
2.8.1 Εναπόθεση στρώματος αλουμίνας .....	17
2.8.2 Εναπόθεση νανοσωματιδίων .....	19
2.8.3 Εναπόθεση ηλεκτροδίων χρυσού.....	20
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	22
3.1 Στατική μελέτη.....	22
3.1.1 Συνδεσμολογία συστήματος στατικής μελέτης.....	22
3.1.2 Αποτελέσματα στατικής μελέτης .....	25



3.2 Δυναμική μελέτη.....	28
3.2.1 Περιγραφή του ταλαντωτή .....	28
3.2.2 Έλεγχος περιοδικής συμπεριφοράς .....	31
3.2.3 Συνδεσμολογία πρώτου συστήματος.....	34
3.2.4 Εκτέλεση και Αποτελέσματα του πρώτου συστήματος.....	35
3.2.5 Συνδεσμολογία δεύτερου συστήματος.....	38
3.2.6 Εκτέλεση και Αποτελέσματα δεύτερου συστήματος.....	40
3.2.6α Ισχύς σήματος αισθητήρων ως συνάρτηση της έντασης του υπολογιστή .	41
3.2.6β Εύρεση πλήρους φάσματος συχνοτήτων.....	48
3.2.6γ Απόκριση αισθητήρων σε πολλαπλά σήματα .....	51
3.2.6δ Παρακολούθηση αυξομείωσης ήχου.....	55
3.2.6ε Καταγραφή μουσικού κομματιού.....	57
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ –ΣΧΟΛΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ .....	60
4.1 Συμπεράσματα .....	60
4.2 Σχόλια για το μέλλον .....	61
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	64
Αναπαραγωγή Δεδομένων Αρχείου .csv με το πρόγραμμα Audacity.....	64
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	72

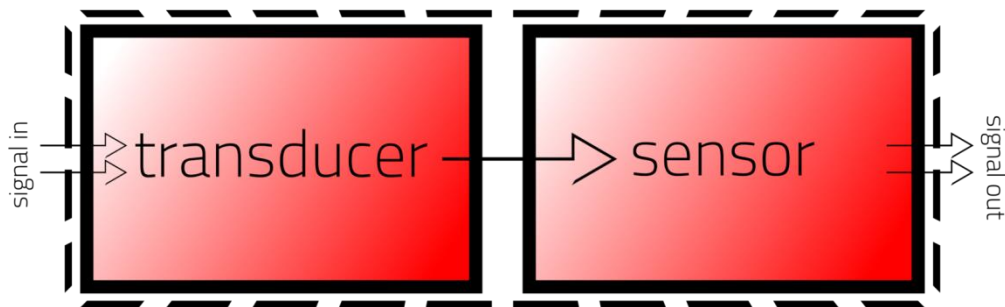
# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

## 1.1 Γενικά στοιχεία

Η τεχνολογία και η επιστήμη είναι αναπόσπαστα συνδεδεμένες με την ικανότητα μέτρησης ενός μεγέθους, είτε αυτό είναι ένα φυσικό, π.χ. ταχύτητα, χημικό όπως το pH κ.α. Όσο καλύτερη είναι η ικανότητα αυτή, τόσο πιο αξιόπιστη είναι η τεχνολογία και η επιστήμη που παράγεται. Οι μετρήσεις, με τη σειρά τους, παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη βελτιωμένων συστημάτων ανίχνευσης των μεγεθών αυτών. Έτσι δημιουργείται μια κυκλική σχέση ανάμεσα στην τεχνολογία και την επιστήμη όπου η πρόοδος αυτών είναι τα προϊόντα της.

Με τον όρο μέτρηση εννοείται ο τρόπος προσδιορισμού του μεγέθους μιας ποσότητας με βάση μια καθορισμένη μονάδα μέτρησης <sup>(1)</sup>. Η αναγκαιότητα συνεχών μετρήσεων φυσικών ποσοτήτων δεν περιορίζεται μόνο στο χώρο της επιστημονικής κοινότητας. Από τα μικρόφωνα στα κινητά τηλέφωνα και τους αισθητήρες εγγύτητας στα αυτοκίνητα <sup>(2)</sup>, μέχρι τους ανιχνευτές καπνού <sup>(3)</sup> και τους μετρητές αρτηριακής πίεσης <sup>(4)</sup>, οι ανιχνευτικές διατάξεις κυριαρχούν στην καθημερινότητα. Υπάρχουν συσκευές που γενικά δεν αντιλαμβανόμαστε πως πρόκειται για αισθητήριες διατάξεις όπως είναι τα κοινά θερμομέτρα, είτε αυτά είναι εξ επαφής ή από απόσταση με τη βοήθεια υπερύθρων <sup>(5)</sup>, αλλά και οι κάμερες CCD (Charged Coupled Device), όπως οι γνωστές, πλέον, DSLR (Digital Single-Lens Reflex) <sup>(6)</sup>. Επιπρόσθετα υπάρχουν διαθέσιμοι αισθητήρες για χαρτογράφηση της ατμόσφαιρας και του εδάφους, με εκπρόσωπο αυτών τα LIDAR (Light Detection and Ranging) συστήματα <sup>(7)</sup>. Οι βιομηχανίες είναι ένας ακόμα κλάδος όπου η μέτρηση φυσικών μεγεθών διαδραματίζει καθοριστικότατο ρόλο, καθώς η αυτοματοποίηση και το μεγαλύτερο μέρος της ασφάλειας βασίζεται σε αυτή <sup>(8)</sup>. Συμπερασματικά φαίνεται πως η κάποτε κατ' εξοχήν επιστημονική διαδικασία της «μέτρησης», πλέον έχει διεισδύσει στον τρόπο ζωής μας και δε μπορεί παρά να θεωρηθεί αναπόσπαστο κομμάτι αυτής.

Οι μετρήσεις των συστημάτων υπό εξέταση γίνονται από τους αισθητήρες, οι οποίοι αισθάνονται αλλαγές στο περιβάλλον τους, άμεσα ή έμμεσα. Ο αισθητήρας είναι μια συσκευή η οποία υφίσταται μία διέγερση (ή ερέθισμα), η οποία μπορεί να είναι μηχανική, βιολογική, χημική ή άλλης φύσεως και τη μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα. Αυτό κατά κύριο λόγο, μπορεί να είναι μία διαφορά τάσης ή μια αλλαγή στο ρεύμα <sup>(9)</sup>. Ένας ακόμα τρόπος να χαρακτηριστεί ένας αισθητήρας είναι με τον όρο μορφοτροπέας (transducer). Αυτός μετατρέπει μια μορφή ενέργειας σε μία άλλη. Ένας μορφοτροπέας συχνά χρησιμοποιείται σε συζυγία με έναν αισθητήρα και αξιοποιείται ώστε να μετατρέψει το αρχικό ερέθισμα σε μια μορφή που θα χρησιμοποιήσει ο κύριος αισθητήρας <sup>(10)</sup>. Όταν ένας οι περισσότεροι μορφοτροπέες χρησιμοποιούνται από μια αισθητήρια διάταξη το σύστημα χαρακτηρίζεται ως περίπλοκο σε αντίθεση με το άμεσο, όπου ο αισθητήρας άμεσα ανιχνεύει το ερέθισμα και δε χρειάζεται κάποια μετατροπή. Μία απλή μετατροπή δε θα ήταν, όμως, χρήσιμη αν δεν υπήρχε μια αντιστοίχιση αυτής με το αντίστοιχο ηλεκτρικό σήμα που λαμβάνεται, δηλαδή μια βαθμονόμηση. Σε περιπτώσεις, όπως στους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες, η αντίστροφη διαδικασία είναι επίσης εφικτή, δηλαδή ένα ηλεκτρικό σήμα να παράξει μία μηχανική μετατόπιση ή παραμόρφωση <sup>(11)</sup>.



**Εικόνα 1:** Σχηματική αναπαράσταση συστήματος αισθητήρα

## 1.2 Κατηγοριοποίηση αισθητήρων

Οι αισθητήρες μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το φυσικό μεγέθους που ανιχνεύουν. Έτσι υπάρχουν οι εξής κατηγορίες (Πίνακας 1).

**Πίνακας 1:** Τύποι αισθητήρων

ΤΥΠΟΣ	ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΟ ΜΕΓΕΘΟΣ
<b>ΘΕΡΜΙΚΟΣ</b> <sup>(12)</sup>	Θερμοκρασία, ροή θερμότητας κλπ
<b>ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ</b> <sup>(13)</sup>	Ηλ. ρεύμα, αντίσταση, χωρητικότητα κλπ
<b>ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΣ</b> <sup>(14)</sup>	Μαγνητική ροή, μαγνητική ροπή κλπ
<b>ΟΠΤΙΚΟΣ</b> <sup>(15)</sup>	Ένταση φωτός, μήκος κύματος κλπ
<b>ΧΗΜΙΚΟΣ</b> <sup>(12)</sup>	pH, συγκέντρωση κλπ
<b>ΠΙΕΣΗΣ/ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ</b> <sup>(16)</sup>	Πίεση, επιμήκυνση, καμπύλωση κλπ
<b>ΔΟΝΗΣΗΣ</b> <sup>(17)</sup>	Εκτόπιση, συχνότητα κλπ
<b>ΥΓΡΑΣΙΑΣ</b> <sup>(18)</sup>	Συγκέντρωση νερού
<b>ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ</b> <sup>(16)</sup>	Επιτάχυνση
<b>ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ</b> <sup>(19)</sup>	Ταχύτητα, απόσταση κλπ
<b>ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΙ</b> <sup>(20)</sup>	Ανίχνευση φυτοφαρμάκων, μεταβολή συγκέντρωσης βιομορίων κλπ

Κάθε αισθητήρας κατατάσσεται ανάλογα με τον τρόπο που λειτουργεί, σε ενεργό ή παθητικό, με τον πρώτο να απαιτεί εξωτερική παροχή ενέργειας και παράγει και ανιχνεύει το δικό του σήμα διέγερσης ενώ ο δεύτερος όχι <sup>(21)</sup>. Δεν υπάρχει ξεκάθαρος καλύτερος τύπος αισθητήρα. Κάθε ένας από αυτούς εκτελεί μια συγκεκριμένη λειτουργία και πρέπει να προσεκτικά να επιλέγεται ώστε να επιτευχθεί ο σκοπός που επιθυμείται. Επίσης σημαντικός παράγοντας είναι το κόστος. Αν και ένας ενεργός αισθητήρας μπορεί να έχει καλύτερα τεχνικά χαρακτηριστικά από τον αντίστοιχο παθητικό, το κόστος μπορεί να είναι απαγορευτικό. Οι αισθητήριες μονάδες περιγράφονται από συγκεκριμένα στατικά και δυναμικά χαρακτηριστικά, τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν κατά τη επιλογή τους.

## 1.3 Στατικά χαρακτηριστικά

Τα στατικά χαρακτηριστικά περιγράφουν αισθητήρες στους οποίους η διέγερση γίνεται με ένα σταθερό σήμα ή με ένα πολύ αργά μεταβαλλόμενο σήμα <sup>(9)</sup>.

### 1. Συνάρτηση μεταφοράς.

Αυτή δηλώνει τη σχέση που έχει το σήμα εισόδου με το σήμα εξόδου. Μπορεί να είναι γραμμική, λογαριθμική, εκθετική, δύναμη ή γραμμικός τους συνδυασμός. Μία γενική σχέση είναι η επόμενη:

$$S = A(a_1 + b_1s) + B(a_2 + b_2 \ln(s)) + C(a_3 + a_3e^{k_3s}) + D(a_4 + b_4s^{k_4}) \quad (1)$$

Όπου  $S$  το σήμα εξόδου,  $s$  το σήμα εισόδου και τα υπόλοιπα συντελεστές που κατασκευάζουν το συνδυασμό της συνάρτησης μεταφοράς.

Για παράδειγμα, αν οι συντελεστές από  $B$ ,  $C$  και  $D$  ισούνται με μηδέν, τότε είναι μία γραμμική συνάρτηση μεταφοράς.

Για κάθε σήμα εισόδου η ευαισθησία του αισθητήρα, μέσω της συνάρτησης μεταφοράς μπορεί να υπολογιστεί μέσω της σχέσης

$$G = \frac{dS(s_o)}{ds} \quad (2)$$

### 2. Πλήρης κλίμακα εισόδου

Η κλίμακα αυτή αντιπροσωπεύει την υψηλότερη δυνατή τιμή που γίνεται να δοθεί ως είσοδος στον αισθητήρα χωρίς να προκαλέσει αισθητή ανακρίβεια. Σε περίπτωση που ο αισθητήρας έχει μη γραμμική απόκριση, η κλίμακα αυτή μετριέται σε dB.

### 3. Πλήρης κλίμακα εξόδου

Αυτή δηλώνει την διαφορά μεταξύ των σημάτων εξόδου όταν εφαρμοστεί η μέγιστη και ελάχιστη τιμή που μπορεί να διαβάσει ο αισθητήρας.

#### 4. Ακρίβεια (Accuracy)

Με την ακρίβεια εννοείται η μέγιστη απόκλιση της τιμής που δίνει ως έξοδο από την ιδανική τιμή που αναμένεται να δώσει. Ακόμα και αυτή η ιδανική τιμή όμως, υπόκειται σε κάποιο σφάλμα. Αν αυτή η τιμή ανακρίβειας μένει σταθερή ή είναι γνωστή η συμπεριφορά της, μπορεί να την αντισταθμιστεί με κατάλληλη βαθμονόμηση.

#### 5. Αξιοπιστία

Η αξιοπιστία δηλώνει την απόκλιση που έχουν τιμές από διαδοχικές μετρήσεις του ίδιου ερεθίσματος από τη μέση τιμή τους. Δηλαδή δείχνει πόσο εντοπισμένες είναι οι μετρήσεις. Συχνά παρατηρείται σε επαναλαμβανόμενες μετρήσεις οι τιμές εξόδου να μεταβάλλονται με σχεδόν γραμμικό τρόπο οπότε συμβαίνει και η λεγόμενη ολίσθηση (drift). Πολύ πιθανό ένας αισθητήρας να είναι αξιόπιστος αλλά με χαμηλή ακρίβεια, συνεπώς να χρειάζεται μία επαναβαθμονόμηση (recalibration) του οργάνου.

#### 6. Διακριτική ικανότητα

Αυτή η ιδιότητα είναι από τις πιο σημαντικές σε ένα αισθητήρα, καθώς υποδεικνύει την ελάχιστη μεταβολή στο σήμα εισόδου που θα παράξει διαφορετικό σήμα εξόδου.

#### 7. Κορεσμός

Ο κορεσμός, ή περιοχή κορεσμού, είναι αυτός κατά τον οποίο αυξανόμενο σήμα εισόδου δίνει ουσιαστικά το ίδιο σήμα εξόδου ή πολύ αργά μεταβαλλόμενο.

#### 8. Μη γραμμικότητα

Αισθητήρες με μη γραμμική συνάρτηση μεταφοράς μπορούν συχνά να διακερματίσουν την περιοχή λειτουργίας τους σε περιοχές που μπορούν να προσεγγιστούν από γραμμική συνάρτηση. Αυτή η προσέγγιση συνοδεύεται από το λεγόμενο σφάλμα μη γραμμικότητας και εξαρτάται από την περιοχή που έχουμε κάνει την προσέγγιση και την γενική συνάρτηση μεταφοράς.

## 9. Υστέρηση

Το σφάλμα της υστέρησης έγκειται στην απόκλιση που έχουν οι τιμές εξόδου όταν η είσοδος έχει ανάστροφη κατεύθυνση. Δεν είναι υποχρεωτικό το σφάλμα υστέρησης να είναι κοινό σε όλο το φάσμα λειτουργίας του αισθητήρα.

## 10. Νεκρή ζώνη

Η ζώνη αυτή βρίσκεται συνήθως περίξ του μηδενός και είναι η περιοχή όπου ο αισθητήρας είναι αναίσθητος και δεν αποκρίνεται, ή αποκρίνεται ελάχιστα, σε εξωτερικά σήματα.

## 11. Διέγερση

Αυτή ορίζεται ως το ηλεκτρικό σήμα που πρέπει να διέρχεται από έναν ενεργό αισθητήρα προκειμένου να μπορεί να αισθανθεί σήματα εισόδου.

## 12. Φυσικά Χαρακτηριστικά

Αυτά είναι τα πραγματικά φυσικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα, όπως το μήκος, η μάζα, όγκος, κλπ.

### **1.4 Δυναμικά χαρακτηριστικά**

Σε αντίθεση με τα στατικά χαρακτηριστικά, τα δυναμικά περιγράφουν τη συμπεριφορά του αισθητήρα όταν αυτός υπόκειται σε χρονομεταβαλλόμενο ερέθισμα. Οι αισθητήρες ανάλογα με την τάξη διαφορικής εξίσωσης που περιγράφεται η συνάρτηση μεταφοράς τους, κατατάσσονται σε αντίστοιχες κατηγορίες. Εάν ο αισθητήρας είναι μηδενικής τάξης τότε δεν έχει δυναμικά χαρακτηριστικά και η απόκριση του είναι άμεση σε εξωτερικό ερέθισμα. Σε αυτή την περίπτωση η συνάρτηση μεταφοράς είναι απλά μια γραμμική συνάρτηση με τη μόνη διαφορά ότι το  $S$  και  $s$  είναι  $S(t)$  και  $s(t)$  αντίστοιχα, δηλαδή:

$$S(t) = a + bs(t) \quad (3)$$

Οι πρώτης τάξης αισθητήρες περιγράφονται από πρώτης τάξης διαφορική εξίσωση αντίστοιχα. Αυτή τη φορά είναι:

$$a \frac{dS(t)}{dt} + bS(t) = s(t) \quad (4)$$

Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει το όριο συχνότητας (cutoff frequency) -3dB που είναι η συχνότητα στην οποία το σήμα εξόδου μειώνεται στο μισό από ότι στο λειτουργικό εύρος συχνοτήτων. Ταυτόχρονα, παρατηρείται και υστέρηση στη φάση, ειδικά στην περίπτωση όπου το σήμα εισόδου είναι κάποιο περιοδικό σήμα. Επίσης δυναμικό χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας είναι και ο χρόνος απόκρισης σε αλλαγή της συχνότητας εισόδου.

Τέλος αναφέρονται οι δευτέρας τάξεως αισθητήρες όπου φυσιολογικά η σχέση συνάρτησης μεταφοράς περιγράφεται από μία δεύτερης τάξεως διαφορική εξίσωση.

$$a \frac{d^2S(t)}{dt^2} + b \frac{dS(t)}{dt} + cS(t) = s(t) \quad (5)$$

Τέτοιου είδους αισθητήρες έχουν δύο εξαρτήματα αποθήκευσης ενέργειας π.χ. ένα ελατήριο με μία μάζα σε κάποιο επιταχυνσιόμετρο. Ακόμα, τέτοιου είδους τάξη περιγράφει μόνο αισθητήρες όπου η αντίδραση τους είναι περιοδικής μορφής. Πολύ πιθανό είναι να περιέχει και κάποιου είδους όρο απόσβεσης ώστε το σήμα να συγκλίνει σε μία συγκεκριμένη τιμή, αν το σήμα εισόδου είναι μια βηματική συνάρτηση για παράδειγμα <sup>(22)</sup>.



## 2. ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

### 2.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Τα νανοσωματίδια είναι συσσωματώματα ατόμων ή μορίων που σχηματίζουν σωμάτια μεγέθους από 1-100nm <sup>(23)</sup>. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες. Έτσι, υπάρχουν νανοσωματίδια με βάση άνθρακα, μεταλλικά νανοσωματίδια, κεραμικά, πολυμερικά, ημιαγωγικά ή λιπιδίων <sup>(24)</sup>.

Τα νανοσωματίδια παρουσιάζουν μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον λόγω των συναρπαστικών ιδιοτήτων τους. Αναφορικά, παρουσιάζουν ιδιαίτερες ηλεκτρικές, οπτικές, μαγνητικές και μηχανικές ιδιότητες, ανάλογα με τον τύπο τους και τον τρόπο κατασκευής τους <sup>(25)</sup> <sup>(26)</sup> ωστόσο η εργασία αυτή περιορίζεται μόνο σε μία ηλεκτρική ιδιότητα.

### 2.2 Εφαρμογές

Έχει παρατηρηθεί ότι η ηλεκτρική αντίσταση από μια συστοιχία μεταλλικών νανοσωματιδίων παρουσιάζει εκθετική εξάρτηση από την απόσταση των σωματιδίων που την απαρτίζουν (περισσότερα στην ενότητα 3.3). Η ιδιότητα αυτή θα αξιοποιηθεί για να κατασκευαστούν αισθητήρες που θα μπορούν να παρατηρούν αλλαγές στις φυσικές διαστάσεις των επί μελέτη αντικειμένων. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται πως τέτοιου τύπου αισθητήρες χρησιμοποιούνται ήδη για την παρακολούθηση δονήσεων κατά τη διαδικασία τρυπανισμού (milling process) <sup>(27)</sup>, ή δονήσεων σε έλικες περιστροφικών μηχανισμών <sup>(28)</sup>. Αναφέρεται ακόμα, πως και μετρήσεις στο ακουστικό φάσμα είναι δυνατές με εξαιρετική απόκριση <sup>(29)</sup>. Η αναγνώριση ανθρώπινης φωνής εμπεριέχεται σε αυτό το πλαίσιο <sup>(30)</sup>. Βέβαια, εκτός από δονήσεις, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν στατικές μετρήσεις πίεσης ή παραμόρφωσης με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Ως παράδειγμα υπάρχουν αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο προσθετικών άκρων <sup>(31)</sup> <sup>(32)</sup>. Τέλος, παραμένοντας στο χώρο του ανθρώπινου σώματος,

μελέτη έχει γίνει και για χρήση τέτοιων αισθητήρων ως μετρητή καρδιακών παλμών <sup>(33)</sup> <sup>(30)</sup>.

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν στο εργαστήριο παρουσιάζουν πολύ υψηλή ευαισθησία οπότε δύναται να αξιοποιηθούν για την ανίχνευση οποιασδήποτε πηγής δόνησης, σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Το θετικό σε σχέση με αισθητήρες ημιαγωγών, οι οποίοι επίσης αυτοί έχουν υψηλή ευαισθησία (~100) <sup>(34)</sup> είναι πως η μέγιστη παραμόρφωση που μπορούν να δεχθούν είναι πολύ μεγαλύτερη. Επιπλέον, λόγω της εκθετικής εξάρτησης της αντίστασης, η ευαισθησία εν γένει αυξάνεται με την παραμόρφωση. Συνεπώς, κάποιες εφαρμογές θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν τη παρακολούθηση της παραμόρφωσης των ελαστικών ενός αεροπλάνου κατά την απογείωση και προσγείωση, καθώς και την παραμόρφωση της ανάρτησης του, ώστε να επιτυγχάνονται ομαλότερα αυτές οι διαδικασίες, ή να ανιχνεύονται τυχόν αστοχίες υλικών. Η τεχνολογία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί και σε οχήματα οδικής κυκλοφορίας. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να καταγράφεται η παραμόρφωση του ελαστικού κατά την επιτάχυνση/επιβράδυνση όπως και κατά την διάρκεια της στροφής. Ήδη υπάρχουν μοντέλα που προτείνουν τρόπους παρακολούθησης παραμόρφωσης του ελαστικού, αλλά περιορίζονται στη δοκιμαστική φάση του <sup>(35)</sup> ή τον μηχανοκίνητο αθλητισμό. Δε θα ήταν αδύνατο να καταγράφεται η μεταβολή του σήματος ώστε να δημιουργείται ένα προφίλ ομαλότητας του δρόμου. Το τελευταίο θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί από οχήματα των τοπικών αρχών για την παραγωγή με σκοπό την βέλτιστη κατανομή πόρων για βελτίωση του οδικού δικτύου.

## 2.3 Μηχανισμός αγωγιμότητας

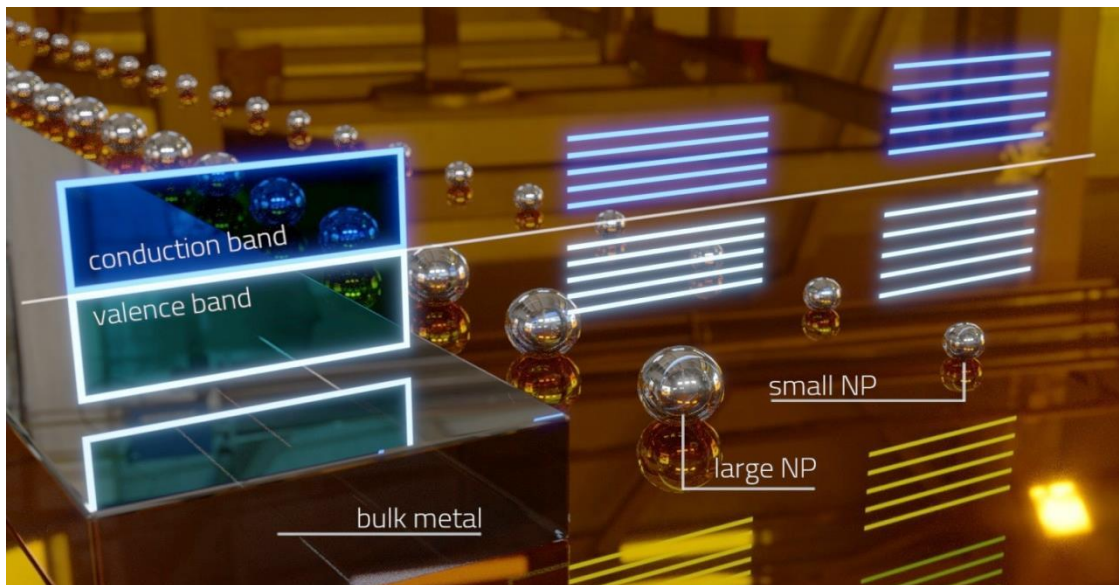
Τα νανοσωματίδια, γενικά, σε αντίθεση με το συμπαγές μέταλλο, έχουν διακριτές ενεργειακές στάθμες οι οποίες απομακρύνονται όσο το μέγεθος αυτών μειώνεται <sup>(36)</sup> (Εικόνα 2). Οι διακριτές καταστάσεις δημιουργούνται λόγω των πιο εντοπισμένων κυματοσυναρτήσεων των ηλεκτρονίων. Όταν τα νανοσωματίδια εναποθετηθούν στο υπόστρωμα δημιουργούν νησίδες, ουσιαστικά, δυναμικού όπου τα ηλεκτρόνια είναι

παγιδευμένα, και ο τρόπος που μεταφέρονται από το ένα στο άλλο είναι μέσω του φαινομένου σήραγγας <sup>(37)</sup>.

Η ιδιότητα που εκμεταλλευόμαστε ως την ενεργό αιτία λειτουργίας του αισθητήρα είναι η έντονη εξάρτηση της ηλεκτρικής αντίστασης μίας συστοιχίας μεταλλικών νανοσωματιδίων (πλατίνας στην δική μας περίπτωση) από τη μεταξύ τους απόσταση. Αυτή η εξάρτηση είναι εκθετική και περιγράφεται από την εξής σχέση <sup>(38)</sup>:

$$R(l) = R_o \exp\left(\beta l + \frac{E_c}{kT}\right) \quad (6)$$

όπου  $R(l)$  η τρέχουσα αντίσταση,  $R_o$  ο προεκθετικός παράγοντας,  $\beta$  ο παράγοντας tunneling,  $l$  η απόσταση διαδοχικών νανοσωματιδίων,  $E_c$  η ενέργεια ενεργοποίησης,  $k$  η σταθερά Boltzmann και  $T$  η θερμοκρασία.



**Εικόνα 2:** Ενεργειακές ζώνες για καταστάσεις του μετάλλου

Ο παράγοντας tunneling εισάγεται, καθώς η μέση απόσταση των νανοσωματιδίων είναι τόση (περίπου 1-5nm) ώστε ο βασικός μηχανισμός ηλεκτρικής αγωγιμότητας, σε θερμοκρασία δωματίου, είναι το κβαντικό φαινόμενο σήραγγας. Έτσι δημιουργούνται αγωγή μονοπάτια για τη διέλευση του ρεύματος, όμως μόνο για σωματίδια που η απόσταση τους τηρεί την προϋπόθεση που αναφέραμε. Υπό το πρίσμα της κλασσικής φυσικής, μιας και η συστοιχία νανοσωματιδίων δεν συντελεί συνεχές μέσο (υπάρχει

αέρας ανάμεσα), θα έπρεπε ο αισθητήρας να συμπεριφέρεται ως πυκνωτής. Παρόλα αυτά, κάτι τέτοιο δε παρατηρείται, όπως θα παρουσιαστεί και στα αποτελέσματά, πράγμα που υποδεικνύει ότι το κβαντικό φαινόμενο όντως λαμβάνει χώρα.

Η ενέργεια ενεργοποίησης είναι ουσιαστικά ή διαφορά δυναμικού που διαχωρίζει γειτονικά νανονσωματίδια, δηλαδή η ελάχιστη ενέργεια που χρειάζεται για να ξεπεράσει το ηλεκτρόνιο την παγίδα δυναμικού του δικού του νανονσωματιδίου και να μεταβεί στο γειτονικό. Είναι δηλαδή <sup>(38)</sup>

$$E_c = \frac{0.5e^2}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r+l} \right) \quad (7)$$

## 2.4 Πολυϊμίδιο Kapton

Εύκολα γίνεται αντιληπτό πως για να κατασκευαστεί ένας αισθητήρας, πρέπει να ελεγχθεί η απόσταση των νανονσωματιδίων, Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση του πολυϊμιδίου Kapton <sup>(39)</sup> που χρησιμοποιείται ως υπόστρωμα για τα νανονσωματίδια και ταυτόχρονα παρέχει μηχανική στήριξη, ελαστική ικανότητα και διαστατική σταθερότητα (δεν αλλάζουν οι διαστάσεις του) σε ένα μεγάλο φάσμα θερμοκρασιών. Επίσης είναι υλικό που αντέχει σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, ιδιότητα επιθυμητή κατά την κατασκευή του αισθητήρα.

Το πολυϊμίδιο Kapton δεν είναι το μόνο διαθέσιμο εύκαμπτο υπόστρωμα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον αισθητήρα. Θεωρητικά οποιοδήποτε ελαστικό υλικό που μπορεί να αντέξει τις θερμοκρασίες και πιέσεις της διαδικασίας εναπόθεσης ηλεκτροδίων και νανονσωματιδίων, όχι όμως απαραίτητα οι ίδιες διαδικασίες με αυτές που θα περιγραφούν στο επόμενο κεφάλαιο, είναι κατάλληλο υλικό για υπόστρωμα, για παράδειγμα το PDMS <sup>(40)</sup>.

## 2.5 Στρώμα Αλουμίνας

Λόγω της ιδιότητας των αισθητήρων να εξαρτάται η ευαισθησία τους στην αλλαγή της απόστασης των νανοσωματιδίων, θα πρέπει να βρεθεί ένας τρόπος για να αυξηθεί χωρίς να μεταβληθεί η πραγματική παραμόρφωση του συστήματος.

Ένας τρόπος που έχει προταθεί είναι η εναπόθεση ενός στρώματος αλουμίνας ( $Al_2O_3$ ) μεταξύ των νανοσωματιδίων και του εύκαμπτου υποστρώματος <sup>(41)</sup>. Η ιδέα αυτή προτείνει να χρησιμοποιηθεί η ιδιότητα της αλουμίνας να δημιουργεί ρωγμές στην επιφάνεια της ύστερα από μηχανική καταπόνηση και έτσι να αυξηθεί δραματικά η ευαισθησία.

Άλλη πρόταση αποτελεί η χρήση της αλουμίνας ως προστατευτικό στρώμα των νανοσωματιδίων από περιβαλλοντικούς παράγοντες (πχ υγρασία) <sup>(42)</sup>. Η μέθοδος αυτή δε φαίνεται να βελτιώνει την ευαισθησία του αισθητήρα, μολονότι επεκτείνει τον χρόνο ζωής του.

## 2.6 Παραμόρφωση του αισθητήρα

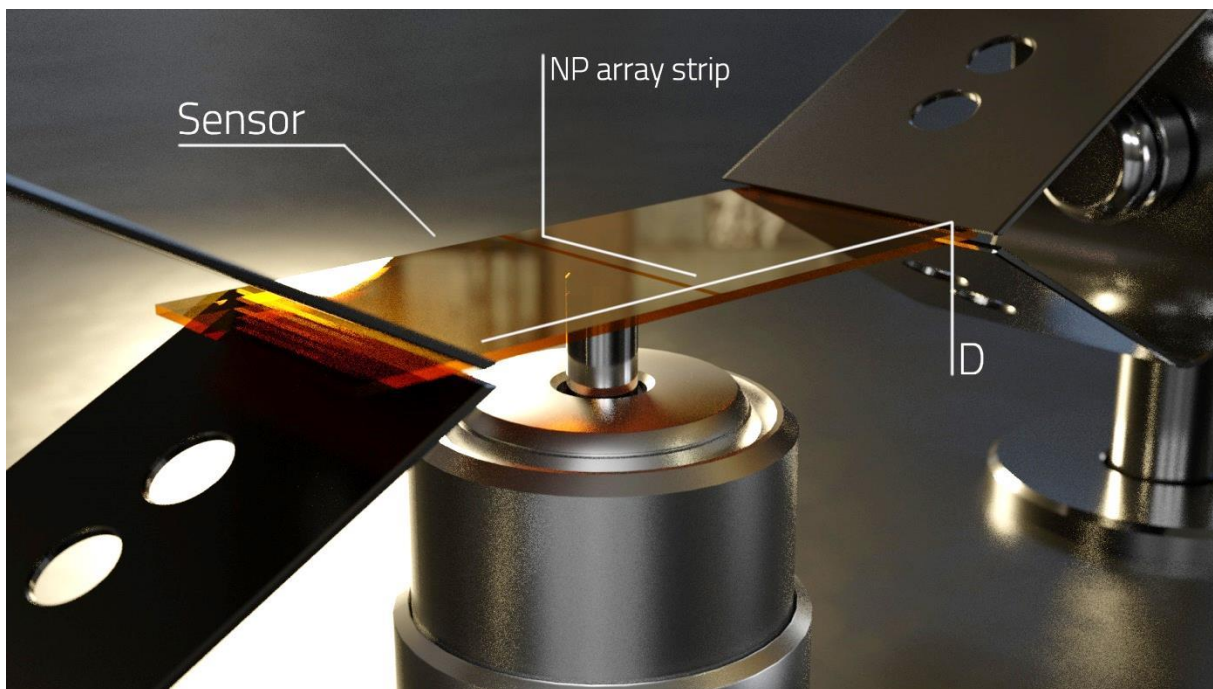
Σε πολλές εφαρμογές είναι αναγκαίο να είναι γνωστή η παραμόρφωση ενός αντικειμένου, είτε αυτή είναι η αλλαγή μήκους μίας δοκού σε κάποιο κτήριο ή η ταλάντωση ενός φτερού αεροπλάνου, ακόμα και η παραμόρφωση μίας μεμβράνης λόγω ακουστικής πίεσης. Για αυτό ορίζεται ένα ακόμα αδιάστατο μετρητικό μέγεθος, η παραμόρφωση <sup>(43)</sup>

$$\varepsilon = \frac{l' - l}{l} \quad (8)$$

με  $l'$  να είναι το τελικό μήκος και  $l$  το αρχικό.

Μία πρώτη παραδοχή που γίνεται είναι ότι τα νανοσωματίδια δεν αλλάζουν θέση σε σχέση με το karton κατά την παραμόρφωση, συνεπώς δεν υπάρχει ολίσθηση. Επίσης

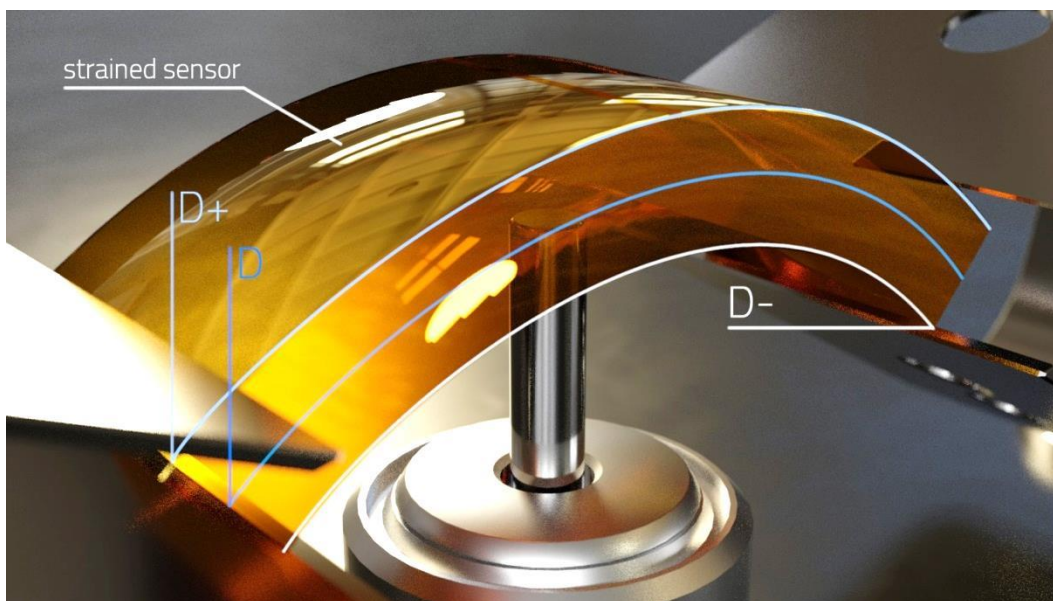
θεωρείται ότι η ευαισθησία του δεν αλλάζει ή μόνο λίγο με την πάροδο του χρόνου (κάτι τέτοιο δε παρατηρείται όμως με την αντίσταση σε γυμνούς αισθητήρες) και τέλος το υπόστρωμα δεν αλλάζει όγκο. Πιο συγκεκριμένα τώρα, ας υποτεθεί ότι το σχήμα (Εικόνα 3) είναι ο αισθητήρας. Με μία μεγέθυνση στο κέντρο του φαίνονται τα τυχαίως εναποθετημένα σωματίδια (Εικόνες 5-6). Οι εικόνες δείχνουν ότι ένα τυχαίο ζεύγος νανοσωματιδίων έχει μία αρχική απόσταση  $l$  και αυτή γίνεται  $l + \delta l$  όταν υφίσταται παραμόρφωση το υπόστρωμα/αισθητήρας. Αν το σύστημα έχει ένα αρχικό μήκος  $D$ , τότε κατά την διέγερση υπάρχει ένας άξονας κάθετος στην παραμόρφωση ο οποίος δεν αλλάζει μήκος, δηλαδή παραμένει  $D$  (Εικόνα 4). Ακόμα, χρησιμοποιώντας την προσέγγιση ότι το πολυϊμίδιο είναι ομογενές στη κατεύθυνση της εξωτερικής δύναμης, ο σταθερός άξονας βρίσκεται στο μέσο του. Τέλος, επισημαίνεται ότι ο τύπος



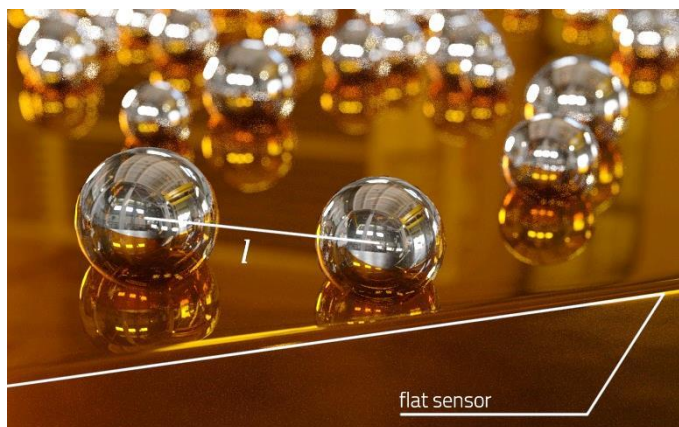
**Εικόνα 3:** Απεικόνιση του αισθητήρα

παραμόρφωσης για τον οποίο που ερευνάται αλλάζει μόνο μια διάσταση στον αισθητήρα και είναι εφελκυστικής ή θλιπτικής φύσεως. Μπορεί να φαίνεται πως ασκείται ροπή για να καμφθεί ο αισθητήρας, όμως το επίπεδο που βρίσκονται τα νανοσωματίδια συμπεριφέρεται ως ένας απλός εφελκυσμός ή θλίψη.

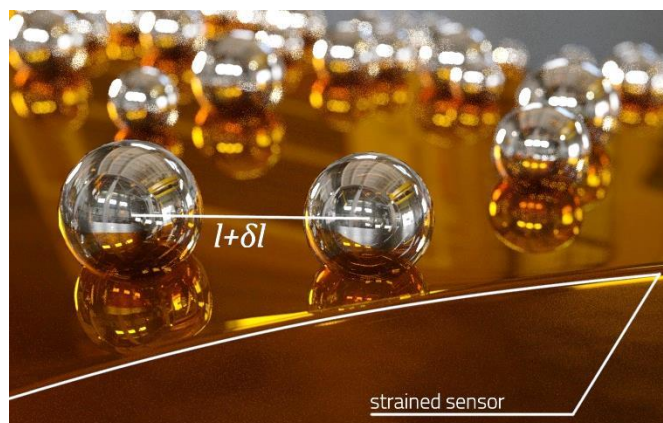




**Εικόνα 4:** Απεικόνιση του αισθητήρα σε παραμορφωμένη κατάσταση (όχι σε κλίμακα)



**Εικόνα 5:** Τυχαίο ζεύγος νανο/δίων σε επίπεδο υπόστρωμα



**Εικόνα 6:** Το ζεύγος σε παραμορφωμένο υπόστρωμα

## 2.7 Μετρητικός παράγοντας

Η ευαισθησία ενός αισθητήρα καθορίζεται από τον μετρητικό του παράγοντα ο οποίος είναι ένας καθαρός αριθμός, το αποτέλεσμα του λόγου της αλλαγής της αντίστασης με την μεταβολή του μήκους. Είναι δηλαδή <sup>(44)</sup>:

$$G_f = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} \quad (9)$$

Όπου  $G_f$  ο μετρητικός παράγοντας (ευαισθησία, gauge factor ή G factor),  $\Delta R$  η μεταβολή της αντίστασης,  $R$  η αρχική αντίσταση,  $\Delta l$  η αλλαγή μήκους και  $l$  το αρχικό μήκος. Έτσι σχηματίζεται μία βολική σχέση για να μετρηθεί η ευαισθησία,

$$G_f = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \quad (10)$$

όπου  $\varepsilon$  η παραμόρφωση.

Για να υπολογιστεί το  $\varepsilon$  επιβάλλεται μία κάμψη στον αισθητήρα που είναι γνωστή, είτε σε μορφή γνωστής κατακόρυφης μεταβολής, ή σε επαφή με κυλινδρικό τομέα γνωστής ακτίνας καμπυλότητας. Οποιαδήποτε και να είναι η πηγή της παραμόρφωσης, θα θεωρηθεί ότι το προφίλ της ακολουθεί κάποιο σταθερό κυκλικό τομέα.

Εδικά στην περίπτωση της κάθετης μεταβολής, αυτή θα έχει ένα μήκος  $s$  (γνωστό). Τότε για τα  $D$ ,  $D^-$ ,  $D^+$  (Εικόνα 4) αντιστοιχούν ακτίνες καμπυλότητας  $R$ ,  $R^-$ ,  $R^+$  αντίστοιχα (Εικόνα 7). Τώρα θα είναι:

$$R^2 = (R - s)^2 + \frac{D^2}{4}$$

και

$$R_+ = R + \frac{d}{2} \text{ και } R_- = R - \frac{d}{2},$$

όπου  $d$  το πάχος του υποστρώματος. Λύνοντας ως προς  $R$



$$R = \frac{4s^2 + D^2}{8s}$$

και

$$D_+ = R_+ d\theta, \quad D = R d\theta$$

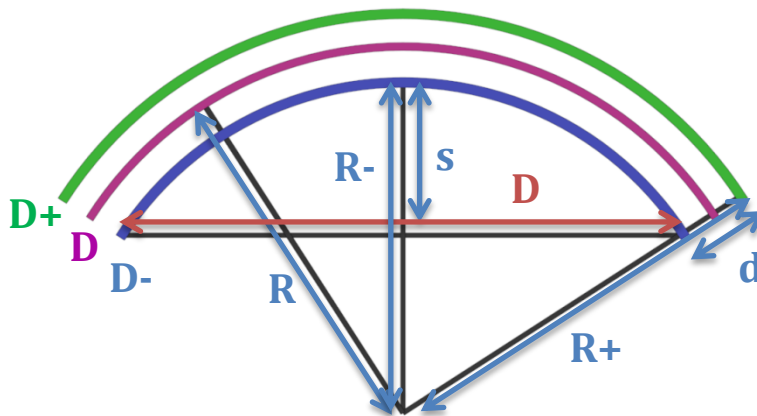
έτσι

$$\varepsilon = \frac{D_+ - D}{D} = \frac{R_+ - R}{R} = \frac{d}{2R}$$

$$\varepsilon = \frac{d}{2R} \quad (11)$$

Τελικά καταλήγουμε σε μία βολική σχέση (11) για να υπολογίζεται η παραμόρφωση και συνεπώς το gauge factor  $G_f$ .

Οι συμβατικοί αισθητήρες μετάλλου σε σχήμα μαιάνδρου, έχουν μία τιμή  $\sim 2$  και οι αισθητήρες ημιαγωγών αυξάνουν αυτή την τιμή περίπου στο  $\sim 100$ . Οι αισθητήρες νανοσωματιδίων μπορούν ανάλογα τον τρόπο κατασκευής τους να φτάσουν από 10 έως  $10^8$  τιμή  $G_f$  <sup>(32)</sup>



**Εικόνα 7:** Σχηματική αναπαράσταση της παραμόρφωσης

## 2.8 Μέθοδοι Κατασκευής Αισθητήρων

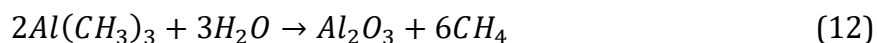
Η προετοιμασία των αισθητήρων έγινε σε στάδια τα οποία συνοψίζονται παρακάτω: Εναπόθεση αλουμίνας, Εναπόθεση νανοσωματιδίων και εναπόθεση ηλεκτροδίων. Το στάδιο εναπόθεσης αλουμίνας παραλήφθηκε για τους «απλούς» αισθητήρες.

### 2.8.1 Εναπόθεση στρώματος αλουμίνας

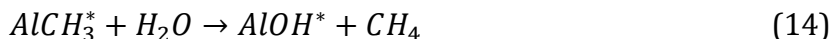
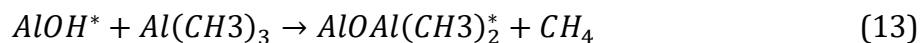
Το πρώτο βήμα προς για τη δημιουργία των αισθητήρων είναι προαιρετικό και χρησιμοποιείται μόνο για τους αισθητήρες που χρειάζονται να επιδείξουν αυξημένη ευαισθησία. Το υμένιο από αλουμίνα κατασκευάζεται μέσω της τεχνικής ALD (Atomic Layer Deposition). Η ALD πρόκειται για μία διαδικασία κατά την οποία υλικά σε αέρια φάση κατασκευάζουν λεπτά στρώματα στερεού υλικού πάνω σε κάποιο υπόστρωμα <sup>(45)</sup>. Κάθε κύκλος ALD δημιουργεί ένα μοναδιαίο επίπεδο (monolayer) και είναι αυτοπεριοριζόμενη (self-limiting) <sup>(46)</sup>.

Το υμένιο που θα κατασκευαστεί έχει χημικό τύπο  $Al_2O_3$ . Συνεπώς χρειάζονται υλικά που να περιέχουν αυτά τα στοιχεία. Αυτά λέγονται πρόδρομα αέρια (precursors) <sup>(47)</sup> και είναι τα trimethylaluminum (TMA) και απιονισμένο νερό ( $H_2O$ ) <sup>(32)</sup>. Σε ένα θάλαμο πολύ χαμηλής πίεσης και σταθερής θερμοκρασίας τοποθετείται το υπόστρωμα πάνω στο οποίο θα αναπτυχθεί το στρώμα της αλουμίνας. Τα αέρια πρόδρομοι εισέρχονται στο θάλαμο ξεχωριστά το ένα από το άλλο. Όταν ολοκληρωθεί η δράση του κάθε προδρόμου, αδρανές αέριο χρησιμοποιείται για να διώξει περισσευούμενο αέριο και πτητικά προϊόντα της αντίδρασης. Έπειτα εισάγεται ο δεύτερος πρόδρομος που θα αντιδράσει με το ημιτελές στρώμα που έχει δημιουργηθεί από το προηγούμενο, ολοκληρώνοντας ένα στρώμα αλουμίνας. Το αδρανές αέριο διώχνει πάλι περισσευούμενα μόρια και ο κύκλος επαναλαμβάνεται (Εικόνα 8).

Η χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι η:

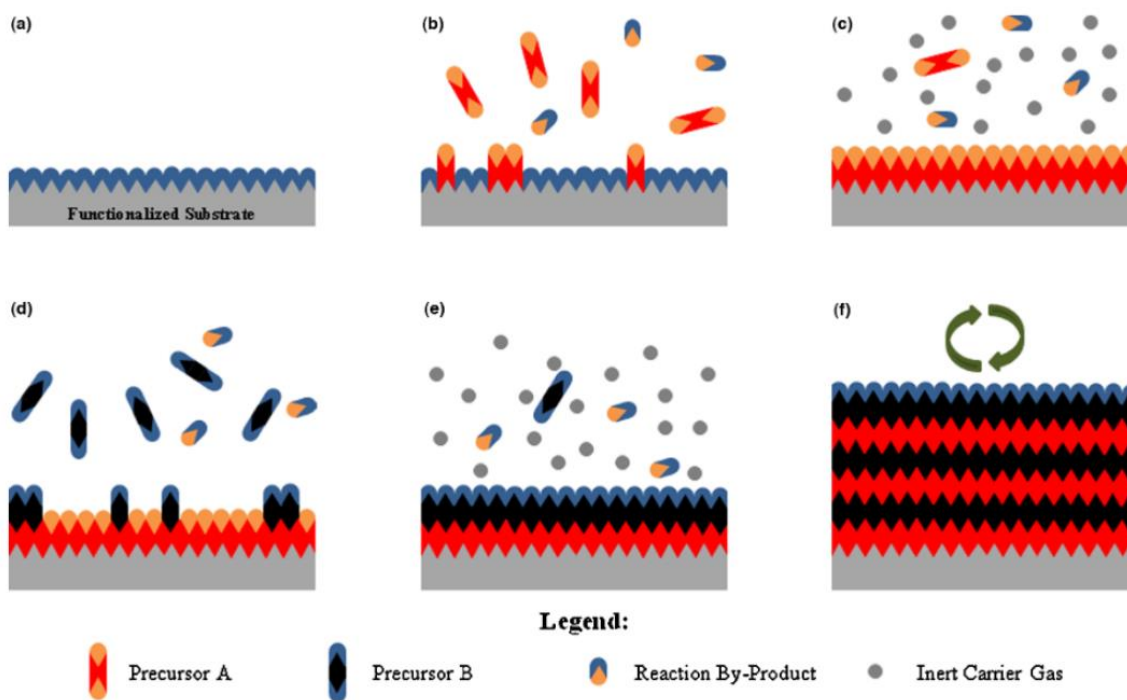


Η γενική αντίδραση αποτελείται από δύο υποαντιδράσεις που συμβαίνουν κυκλικά.



Οι ενώσεις με αστερίσκο (\*) δηλώνουν ποια ένωση σε κάθε φάση του κύκλου βρίσκεται στην ελεύθερη επιφάνεια του υμενίου και πρόκειται να αντιδράσει ώστε να συνεχιστεί η κατασκευή του <sup>(48)</sup>.

Η ALD έγινε μέσω του RS-200 Picosun ALD system. Η πίεση ήταν σταθερή 10mbar και



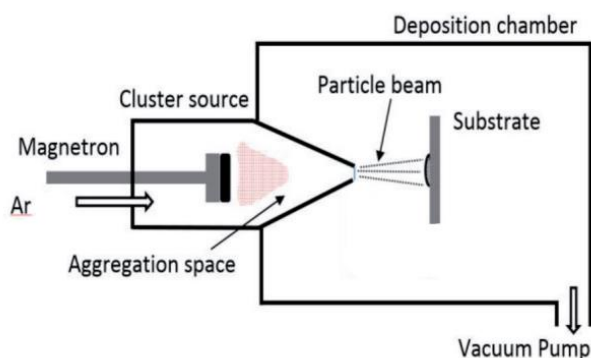
**Εικόνα 8:** Σχηματική αναπαράσταση ενός κύκλου ALD με δύο προδρόμους **(a)**: Το υπόστρωμα χωρίς έτοιμο για επιστρωμάτωση **(b)**: Ο πρώτος πρόδρομος δημιουργεί το μισό στρώμα **(c)**: Περισσευούμενο αέριο και προϊόντα διώχνονται από το αδρανές αέριο **(d)**: Εισαγωγή του δεύτερου προδρόμου και αντίδραση με τα άτομα του μορίου του πρώτου για την ολοκλήρωση μίας στρώσης υμενίου **(e)**: Περισσευούμενο δεύτερο αέριο και προϊόντα της αντίδρασης διώχνονται από το αδρανές αέριο **(f)**: Ο κύκλος επαναλαμβάνεται

Πηγή: (Johnson et al., 2014)

με σταθερή ροή 300sccm αζώτου (N<sub>2</sub>) καθαρότητας 99.999% (αδρανές αέριο) <sup>(45)</sup>. Η θερμοκρασία ήταν ρυθμισμένη στους 80° C. Εκτελέστηκαν 300 κύκλοι και το τελικό πάχος της αλουμίνιας ήταν 30nm.

### 2.8.2 Εναπόθεση νανοσωματιδίων

Το επόμενο βήμα στην κατασκευή των αισθητήρων είναι η εναπόθεση των νανοσωματιδίων πάνω στο υπόστρωμα. Αυτό μπορεί να είναι η αλουμίνη ή απλώς το πολυϊμίδιο. Η τεχνική που χρησιμοποιείται εδώ είναι η ιοντοβολή (sputtering) <sup>(49)</sup>. Πιο αναλυτικά, σε ένα θάλαμο κενού εισάγουμε το στόχο, που είναι ένα δισκίο από συμπαγές υλικό. Αυτό θα αποτελέσει την πηγή των νανοσωματιδίων. Έπειτα, εφαρμόζουμε σε αυτόν αρνητικό δυναμικό. Απέναντι από αυτόν υπάρχει η βάση που περιλαμβάνει το υπόστρωμα. Ο θάλαμος γεμίζει με αδρανές αέριο αργού. Το δυναμικό που έχει δημιουργηθεί από στον στόχο, ιονίζει το αργό και επιβάλλει στα θετικά φορτισμένα, πλέον, άτομα να κατευθυνθούν προς τον στόχο. Η πρόσκρουση αυτών με το συμπαγές μέταλλο αναγκάζει άτομα από την επιφάνεια του να αποκολληθούν και να οδηγηθούν προς το υπόστρωμα.



**Εικόνα 9:** Σχηματική αναπαράσταση συστήματος DC magnetron sputtering

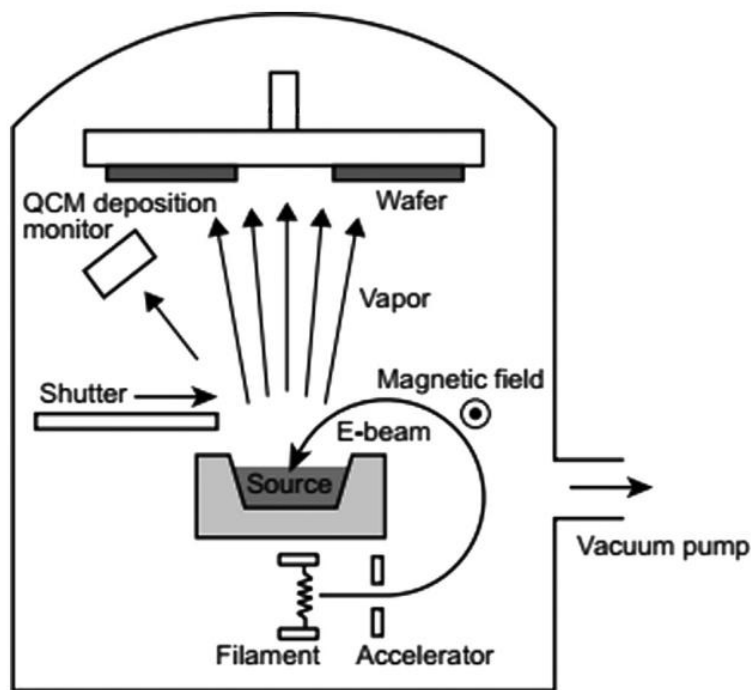
συσσωματώματα αυξάνοντας την μέση διάμετρο τους <sup>(51)</sup>. Η επιφανειακή κάλυψη του υποστρώματος αυξάνει όσο περισσότερη ώρα αφήσουμε τη διαδικασία να λειτουργεί.

Τα νανοσωματίδια που κατασκευάστηκαν για αυτό το πείραμα είχαν μέση διάμετρο τα 4nm.

Για να αυξηθεί η απόδοση του συστήματος, πίσω από τον στόχο τοποθετείται είναι τοροειδής μαγνήτης που εξαναγκάζει το φορτισμένο αργό να κατευθυνθεί προς τον στόχο <sup>(50)</sup>. Τα σωματίδια που δημιουργούνται διέρχονται από ένα σωλήνα (aggregation zone) και με αυτό τον τρόπο εξαναγκάζονται να δημιουργούν

### 2.8.3 Εναπόθεση ηλεκτροδίων χρυσού

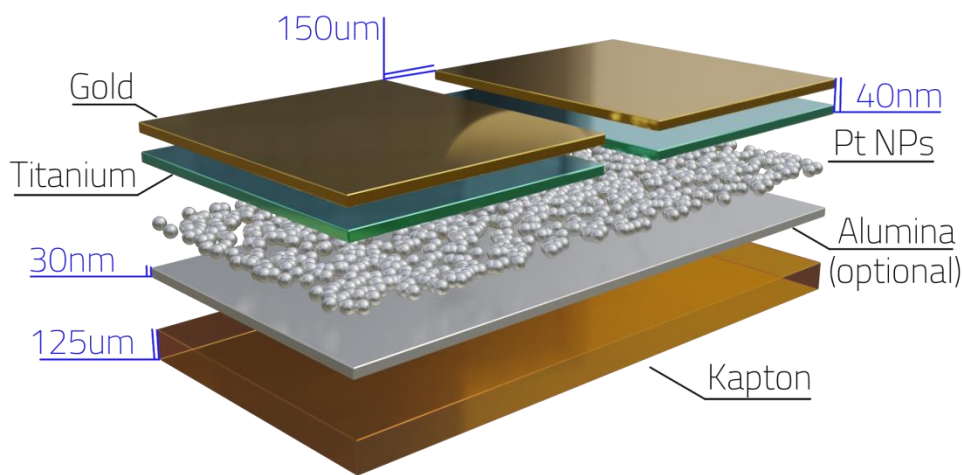
Το τελευταίο βήμα για την κατασκευή των αισθητήρων περιλαμβάνει την εναπόθεση ηλεκτροδίων πάνω στα νανοσωματίδια. Η μέθοδος για να επιτευχθεί αυτό είναι μέσω της εξαχνωσης με κανόνι ηλεκτρονίων (e-beam evaporation). Όπως και στην προηγούμενη μέθοδο του sputtering, έτσι και εδώ δημιουργείται υψηλό κενό  $5 * 10^{-5} mbar$  στο θάλαμο. Ο στόχος αντί για δισκίο είναι μία ράβδος τοποθετημένη σε μια κάψουλα. Η δημιουργία ηλεκτρονίων γίνεται μέσω του φαινομένου της θερμιονικής εκπομπής <sup>(52)</sup> με τη χρήση ενός νήματος βολφραμίου <sup>(53)</sup>. Τα εκπεμπόμενα ηλεκτρόνια καθοδηγούνται από έναν μαγνήτη στον στόχο, ασκώντας δύναμη Lorentz σε αυτά, και τον εξαχνώνουν <sup>(50)</sup> (Εικόνα 10).



Εικόνα 10: Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος e-beam evaporation

Τα εξαχνώμενα σωμάτια, στην πορεία προς το υπόστρωμα, μπορεί να προσκρούσουν με τα εισερχόμενα ηλεκτρόνια και να χάσουν ένα ηλεκτρόνιο λόγω της σύγκρουσης. Επίσης τα σωματίδια αυτά είναι πολύ θερμά και για αυτό θα πρέπει το υπόστρωμα να αντέχει την θερμοκρασία χωρίς να καταστρέφεται.

Για τους αισθητήρες που φτιάχτηκαν, χρειάστηκε να αφεθεί μια λωρίδα πάχους 150μm ακάλυπτη από ηλεκτρόδιο. Αυτή η περιοχή θα δράσει ως η αισθητήρια πηγή του ανιχνευτή. Για να μείνει ακάλυπτη αυτή η λωρίδα, χρησιμοποιήθηκε μία μάσκα (shadow mask). Η μάσκα αυτή είναι μία μεταλλική λωρίδα που τοποθετείται ανάμεσα στην τροχιά των ατμών του στόχου και του υποστρώματος <sup>(54)</sup>. Η κατασκευή των ηλεκτροδίων απαιτούσε τη χρήση δύο μετάλλων. Το πρώτο ήταν τιτάνιο και λειτουργούσε ως στρώμα προσκόλλησης και το δεύτερο χρυσός, πάνω από το τιτάνιο. Συνολικά τα ηλεκτρόδια είχαν 40nm πάχος.



**Εικόνα 11:** Σχηματική αναπαράσταση των στρώσεων που απαρτίζουν τον αισθητήρα. **1<sup>η</sup> στρώση:** πολυϊμίδιο από Kapton πάχους 125μm., **2<sup>η</sup> στρώση:** υμένιο αλουμίνας πάχους 30nm. **3<sup>η</sup> στρώση:** νανοσωματίδια πλατίνας μέσης διαμέτρου 4nm. **4<sup>η</sup> στρώση:** Συνδετικό υμένιο τιτανίου. **5<sup>η</sup> στρώση:** Ηλεκτρόδια χρυσού. Συνολικό πάχος χρυσού και τιτανίου 40nm. Διάκενο ηλεκτροδίων: 150μm.

### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το πειραματικό κομμάτι αποτελεί το κυριότερο μέρος της διπλωματικής εργασίας και το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα αφιερώθηκε εδώ. Έγιναν τρία διαφορετικά πειράματα, το ένα εξέτασε τους αισθητήρες σε στατική κατάσταση και χρησιμοποιήθηκε ως τρόπος χαρακτηρισμός αυτών και τα άλλα δύο μελέτησαν τη δυναμική συμπεριφορά τους.

#### 3.1 Στατική μελέτη

##### 3.1.1 Συνδεσμολογία συστήματος στατικής μελέτης

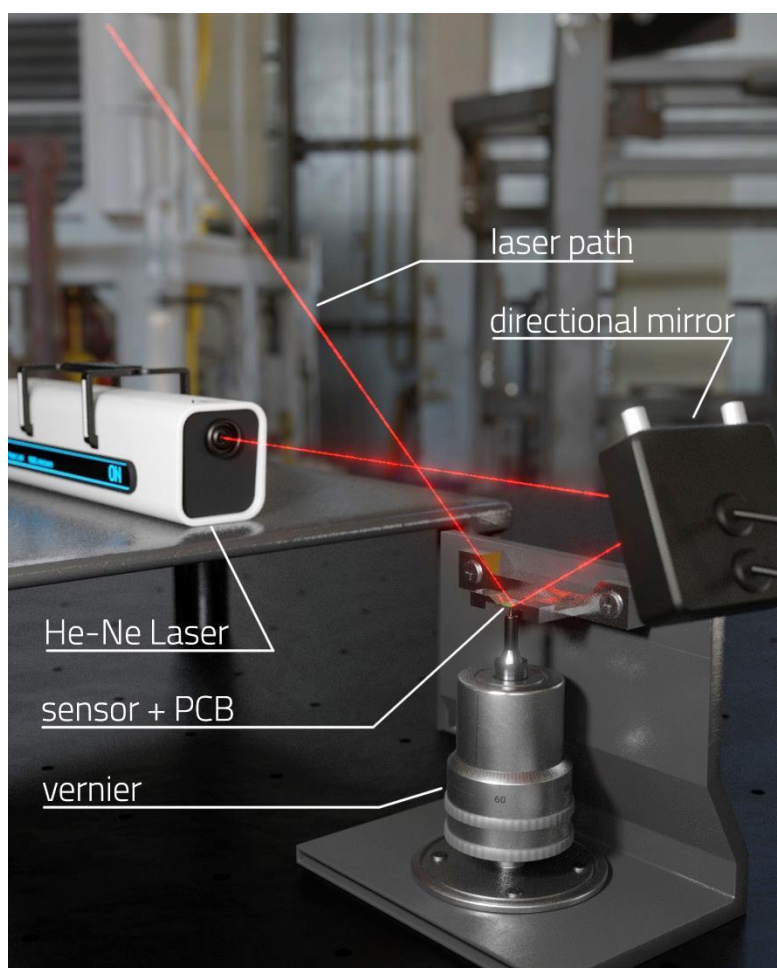
Για το χαρακτηρισμό των αισθητήρων έγινε χρήση ενός μικρομετρικού βερνιέρου ο οποίος μετατόπισε το κέντρο του υπό δοκιμή αισθητήρα κατά ελεγχόμενα διαστήματα, ενώ τα άκρα αυτού παρέμεναν ακλόνητα. Για να εξασφαλιστεί η ακεραιότητα του αισθητήρα και η κάμψη του να ακολουθεί έναν κυκλικό τομέα, προσκολλήθηκε σε αυτόν ένα pcb (του οποίου το μήκος ήταν γνωστό ίσο με 13mm, όπως και το πάχος ίσο με 450μm), μέσω carbon tape. Η διάταξη που περιγράφηκε φαίνεται στην Εικόνα 14 και αποτελεί την υλοποίηση της ιδέας που παρουσιάστηκε στο κεφ. 4.

Ο χαρακτηρισμός έγινε σε δύο τύπους αισθητήρων, τους «απλούς» χωρίς επίστρωση αλουμίνιας, και αυτούς με επίστρωση αλουμίνιας. Οι τελευταίοι πριν χαρακτηριστούν έπρεπε να εκπαιδευθούν πρώτα με 130 επαναλήψεις παραμόρφωσης, ώστε να αναπτυχθούν ρωγμές στο στρώμα αλουμίνιας που θα επιτρέψει στον αισθητήρα να φτάσει πολύ υψηλότερα επίπεδα ευαισθησίας.

Μέσω ηλεκτροδίων ακίδας (probers) τα ηλεκτρόδια χρυσού του αισθητήρα ήρθαν σε επαφή με το σύστημα μέτρησης αντίστασης Keithley 2400 <sup>(55)</sup>. Η πρώτη επαφή έγινε όταν ο αισθητήρας ήταν επίπεδος και αυτό το ελέγχθηκε με μία δέσμη laser (Εικόνα 12).

Αναλυτικότερα, χρησιμοποιήθηκε ένα laser He-Ne χαμηλής έντασης (1mW) και η δέσμη αυτού καθοδηγήθηκε σε ένα κάτοπτρο του οποίου η θέση και γωνία μπορούσε να μεταβληθεί μέσω μικρών βερνιέρων. Η ανάκλαση της δέσμης κατευθύνθηκε προς τον

στερεωμένο αισθητήρα. Μιας και το μεγαλύτερο ποσοστό της επιφάνειας του αισθητήρα αποτελείται από τα ηλεκτρόδια χρυσού, δηλαδή μέταλλο, η δέσμη ανακλάται με κατεύθυνση τον τοίχο του εργαστηρίου. Κατά την ευθυγράμμιση του αισθητήρα, ο βερνιέρος που επρόκειτο να παραμορφώσει τον αισθητήρα δεν ήταν σε επαφή με αυτόν. Έτσι στην αδιατάρακτη κατάσταση του συστήματος, ήταν βέβαιο ότι η ανάκλαση προέρχεται από επίπεδο αισθητήρα. Έπειτα ο βερνιέρος περιστράφηκε ώστε το έμβολο του να ανυψωθεί. Το σημείο όπου παρατηρήθηκε ελάχιστη αλλαγή στο ίχνος της δέσμης στον τοίχο, πρόδιδε το σημείο μηδέν των μετρήσεων μας.



**Εικόνα 12:** Διαδικασία εύρεσης σημείου μηδέν των μετρήσεων της στατικής μελέτης του αισθητήρα

Ο μετρητής αντίστασης συνδέθηκε με ηλεκτρονικό υπολογιστή και μέσω software που συνοδεύει το μηχάνημα ελεγχόταν η λειτουργία του.

Στο software οι ρυθμίσεις ήταν:  
Instrument: **Keithley 2400**,  
Mode: **Manual**, Source type:  
**Voltage**, Source Value: **1**,  
Compliance: **1e-3**.

Για να ξεκινήσει η μέτρηση, πρώτα επιλέχθηκε η επιλογή **“Don't save data”** και ελέγχθηκε ότι είχαμε καλή επαφή. Όταν η επαφή ήταν σίγουρο πως ήταν ορθή, έγινε ξανά κλικ στην προηγούμενη επιλογή και ξεκίνησαν οι μετρήσεις.





**Εικόνα 13:** Σύστημα χαρακτηρισμού αισθητήρων (στατική παραμόρφωση)



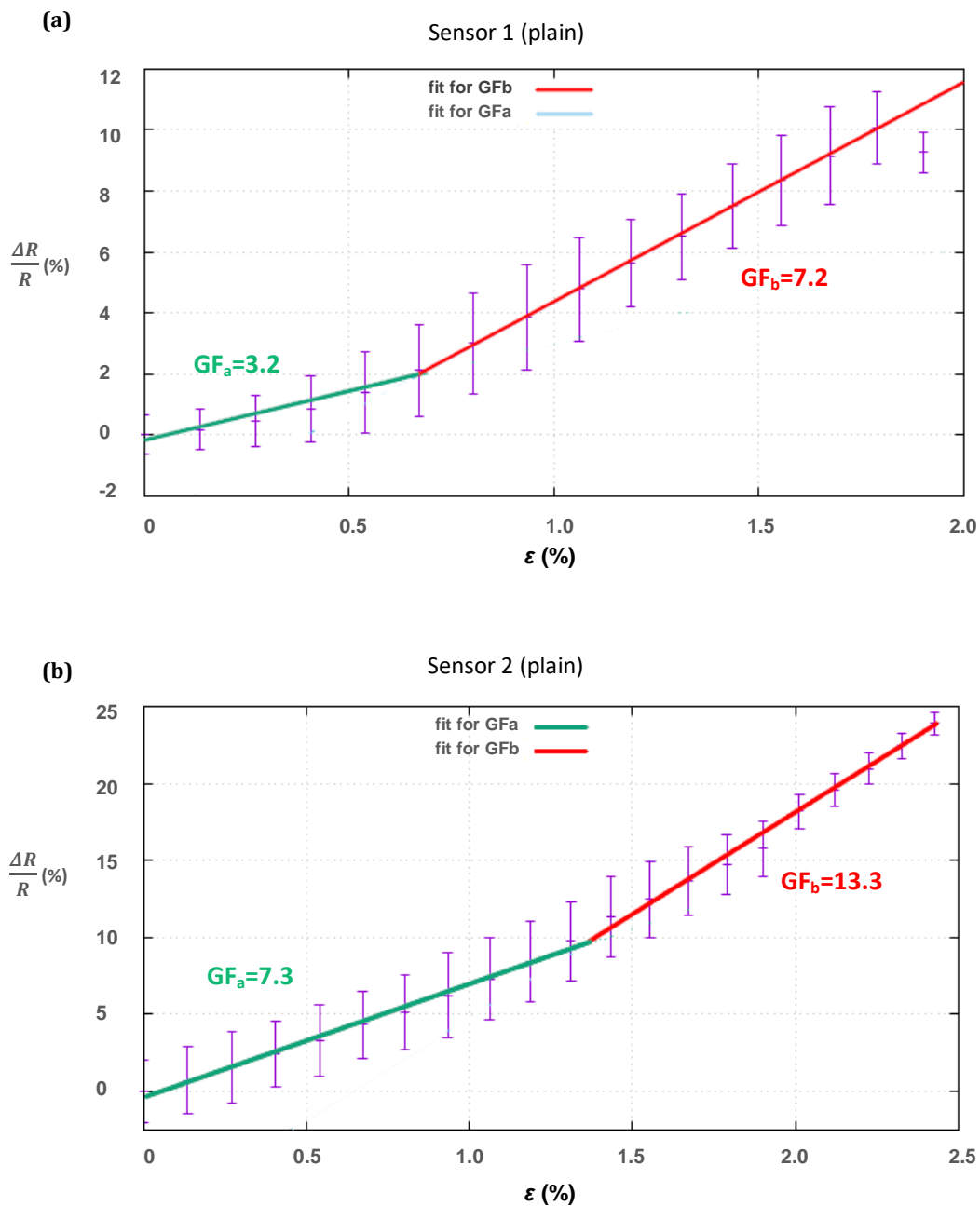
**Εικόνα 14:** Μηχανισμός στατικής παραμόρφωσης

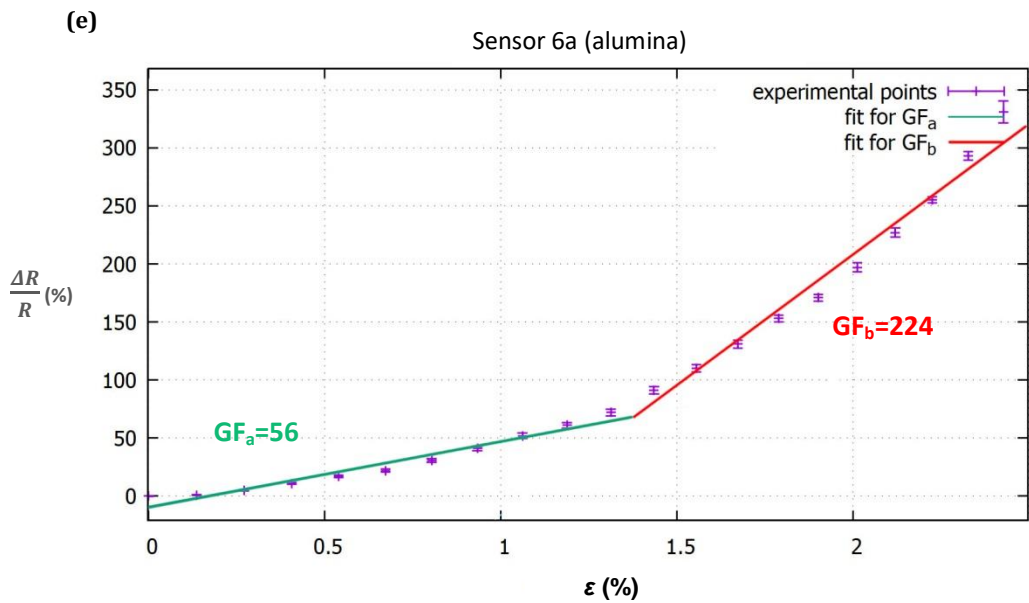
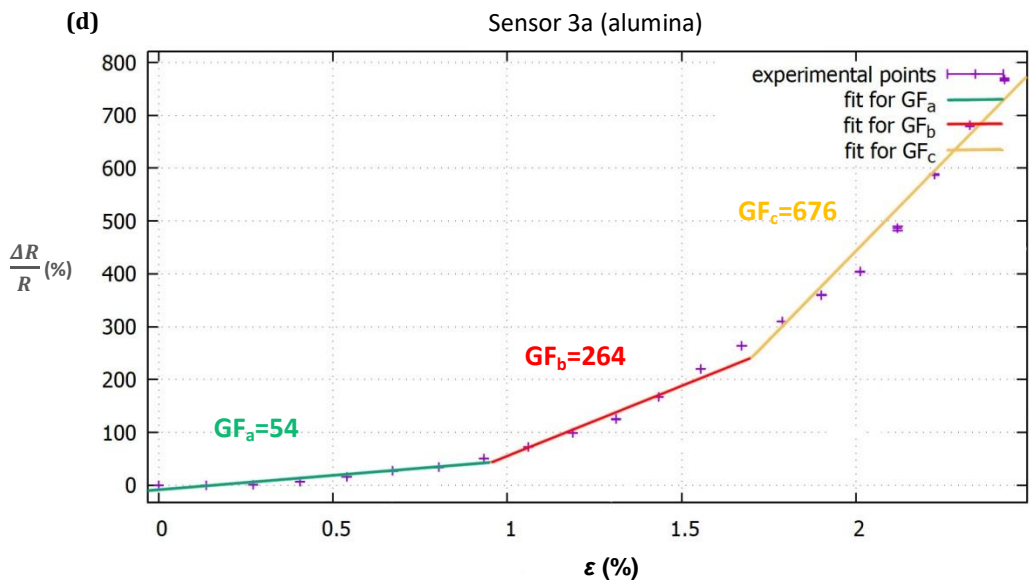
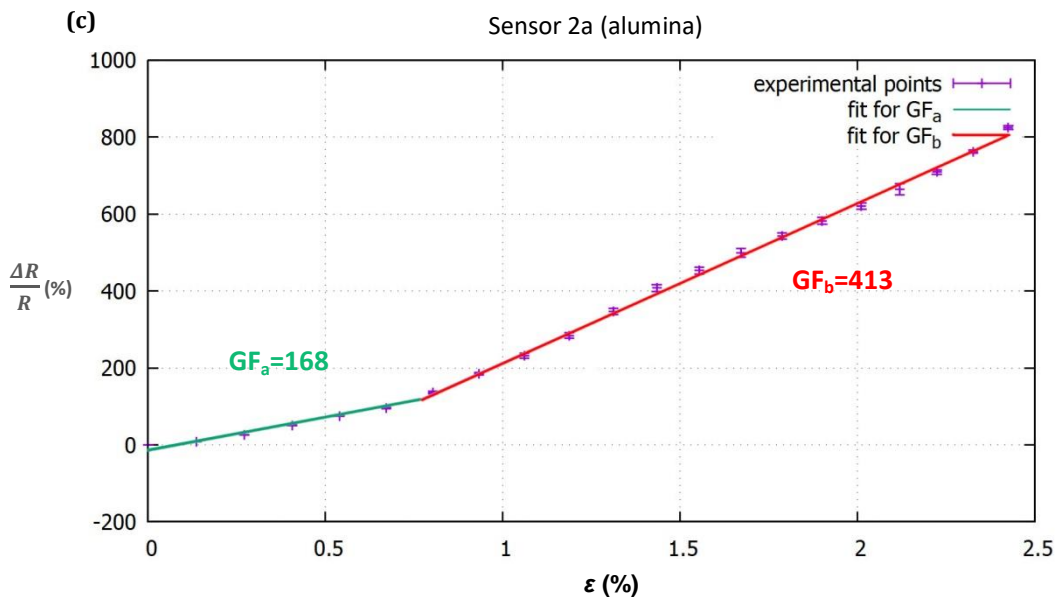
Κάθε μετατόπιση απείχε 100μm από την προηγούμενη και ο αισθητήρας παρέμενε στην τρέχουσα κατάσταση για 30sec. Η καταγραφή των μετρήσεων επεξεργάστηκε κατάλληλα για να δημιουργηθεί γραφική παράσταση της παραμόρφωσης  $\epsilon$  με την  $\Delta R/R$ . Η κλίση της βέλτιστης ευθείας είναι το G factor. Όπου απαιτήθηκε, δύο ευθείες χαραχτήκαν σε διαφορετικές περιοχές του γραφήματος. Τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Οι διαστάσεις του καμπτόμενου συνόλου, δηλαδή ο αισθητήρας με το pcb και την κόλλα, ήταν:

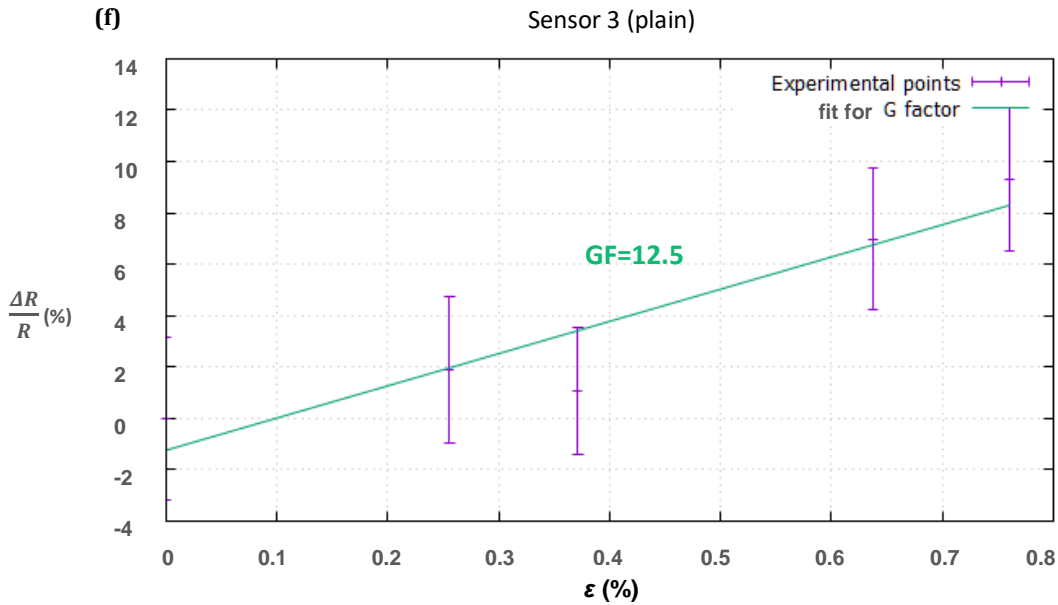
μήκος 13mm, πάχος 675μm.

### 3.1.2 Αποτελέσματα στατικής μελέτης

Τρεις «απλοί» αισθητήρες βαθμονομήθηκαν με αυτή την τεχνική και τρεις αλουμίνιας. Στα επόμενα διαγράμματα (Εικόνα 15) παρουσιάζεται η προσαρμογή των καμπυλών στα πειραματικά δεδομένα.







**Εικόνα 15:** Αποτελέσματα στατικής μελέτης **(a):** Αισθητήρας 1, GF=3.2-7.2 **(b):** Αισθητήρας 2, GF=7.3-13.3 **(c):** Αισθητήρας 2a, GF=168-413 **(d):** Αισθητήρας 3a, GF=54-676 **(e):** Αισθητήρας 6a, GF=56-224 **(f):** Αισθητήρας 3, GF=12.5

Φαίνεται ότι οι πρώτοι αισθητήρες που μετρήθηκαν δίνουν ευαισθησία η οποία είναι μεγαλύτερη από αυτή των συμβατικών μεταλλικών αισθητήρων μαιάνδρου οι οποία κυμαίνεται περίπου στο 2. Επιπλέον, παρατηρείται δραματική διαφορά στην ευαισθησία μεταξύ των «απλών» αισθητήρων νανοσωματιδίων και αυτών με την επίστρωση αλουμίνας, που οφείλεται ακριβώς στις ρωγμές των τελευταίων. Αυτό διαδραματίζει τόσο μεγάλο ρόλο, που η πολύ μικρή σχετικά ηλεκτρική αντίσταση τους να μην εμποδίζει τον αισθητήρα να αναπτύξει πολύ μεγάλες τιμές ευαισθησίας, η οποία ξεπερνάει κατά 2-4 φορές υπό ορισμένες συνθήκες αυτή των αισθητήρων παραμόρφωσης ημιαγωγών. Τέλος, όπως αναφέρθηκε, χρειάστηκε να χαραχτούν δύο καμπύλες ευαισθησίας για διαφορετικές τιμές παραμορφώσεων (ακόμα και τρεις σε κάποια περίπτωση).

**Πίνακας 2:** Ευαισθησία αισθητήρων υπολογισμένων με στατική μελέτη

<b>Αισθητήρας (plain):</b>	<b>Βασική Αντίσταση</b>	<b>GF<sub>a</sub></b>	<b>GF<sub>b</sub></b>	<b>GF<sub>c</sub></b>	<b>δ GF<sub>a</sub></b>	<b>δ GF<sub>b</sub></b>	<b>δ GF<sub>c</sub></b>
<b>1</b>	408KΩ	<b>3.2</b> για ε (0-0.80)%	<b>7.2</b> για ε (0.80-1.90)%	NaN	+/- 0.4	+/- 0.1	NaN
<b>2</b>	2.32MΩ	<b>7.3</b> για ε (0-1.55)%	<b>13.3</b> για ε (1.55-2.43)%	NaN	+/- 0.2	+/- 0.4	NaN
<b>3</b>	1.7MΩ	<b>12.5</b> για ε (0-0.8)%	NaN	NaN	+/- 2.7	NaN	NaN
<b>Αισθητήρας (alumina):</b>							
<b>2a</b>	6.1KΩ	<b>168</b> για ε (0-0.80)%	<b>413</b> για ε (0.80-2.43)%	NaN	+/- 13	+/- 5	NaN
<b>3a</b>	3.8KΩ	<b>54</b> για ε (0-0.93)%	<b>264</b> για ε (0.93-1.55)%	<b>676</b> για ε (1.55-2.43)%	+/- 7	+/- 25	+/- 50
<b>6a</b>	1.4KΩ	<b>56</b> για ε (0-1.31)%	<b>224</b> για ε (1.31-2.43)%	NaN	+/- 3	+/- 12	NaN

## 3.2 Δυναμική μελέτη

### 3.2.1 Περιγραφή του ταλαντωτή

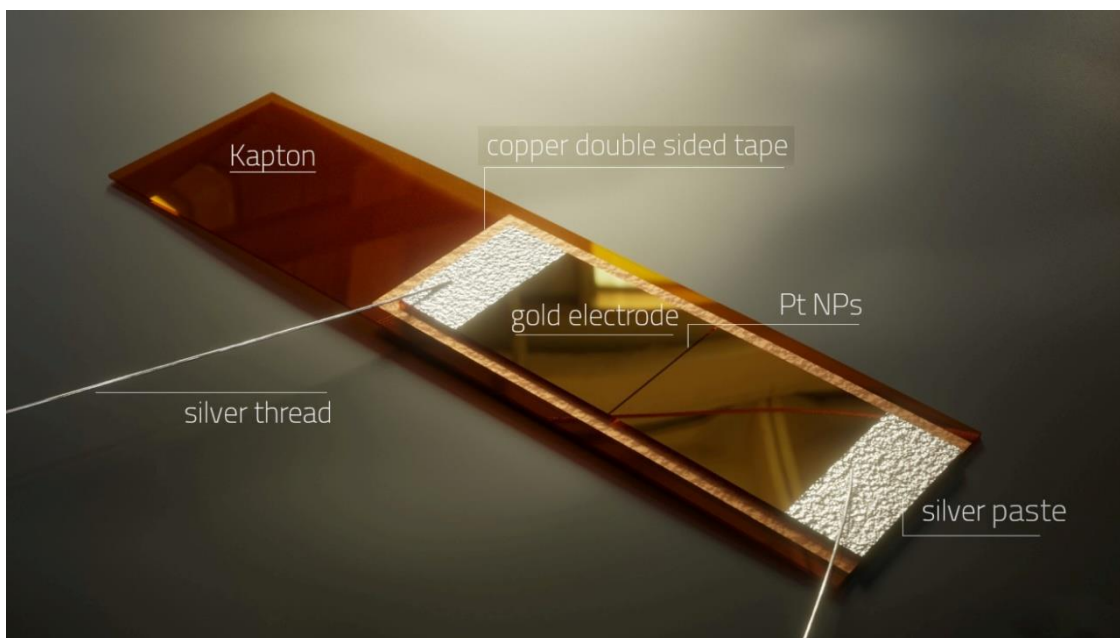
Παρότι η στατική μελέτη είναι αδιαμφισβήτητα απαραίτητη για τον προσδιορισμό της ευαισθησίας του αισθητήρα, δε παύει παρά να αποτελεί το προκαταρκτικό μέρος της πειραματικής διαδικασίας, καθώς η δυναμική μελέτη είναι η κατάσταση που θα μελετηθεί κυρίως.

Ο σκοπός, όπως έχει αναφέρει είναι να τεθεί ο αισθητήρας σε ταλάντωση. Αυτό μελετήθηκε με δύο τρόπους, ο ένας αφορά τις χαμηλές συχνότητες και ο τελευταίος τις πιο υψηλές, ακουστικές.

Και οι δύο μηχανισμοί βασίζουν τη λειτουργία τους στην αλληλεπίδραση των εναλλασσόμενων μαγνητικών πεδίων με κάποιο έμβολο μαγνητικής φύσεως <sup>(56)</sup>.

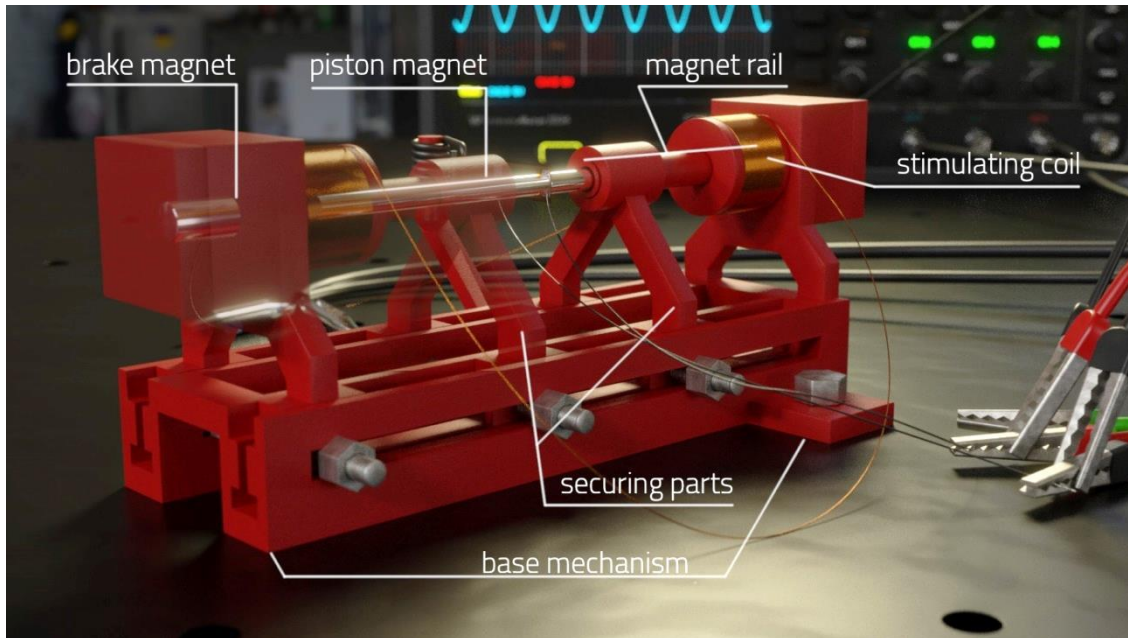
Πρώτα έπρεπε να προετοιμαστεί ο αισθητήρας. Οι άκρες ενισχύθηκαν με κόλλα αργύρου ώστε να τοποθετηθεί αγωγίμο νήμα, ουσιαστικά επιμηκύνοντας τα ηλεκτρόδια του. Η προετοιμασία αυτή ήταν βασική και για τους δύο μηχανισμούς. Ειδικά για τον πρώτο, χρησιμοποιήθηκε ένα μεγαλύτερο επιπλέον υπόστρωμα kapton για να μπορέσει να τον συνδεθεί με το μηχανισμό. Τα δύο υποστρώματα συνδέθηκαν με διπλοκολλητική ταινία χαλκού (Εικόνα 16).

Το πρώτο πείραμα έγινε για τις χαμηλές συχνότητες. Χρειάστηκε μία διάταξη η οποία θα μπορεί να στεγάζει τον αισθητήρα αλλά και να μπορεί να προσδίδει ελεγχόμενη ταλάντωση (Εικόνα 17). Αυτό το επιτεύχθηκε σχεδιάζοντας την στο πρόγραμμα Blender 2.83 <sup>(57)</sup> και έπειτα εκτυπώθηκε μέσω 3D εκτυπωτή Raise3D Pro2Plus <sup>(58)</sup>.

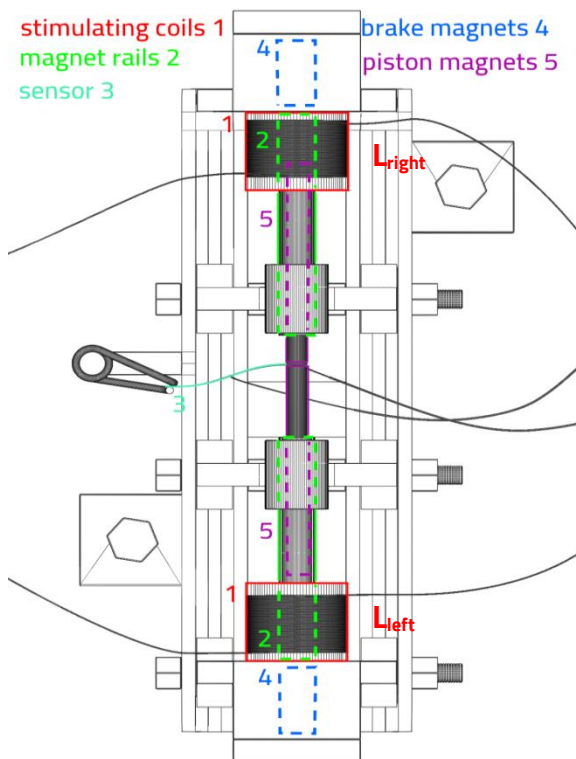


**Εικόνα 16:** Προετοιμασία αισθητήρα για τον πρώτο μηχανισμό ταλάντωσης





**Εικόνα 17:** Εκτυπωμένος μηχανισμός ταλάντωσης



**Εικόνα 18** Κάτοψη του εκτυπωμένου μηχανισμού ταλάντωσης

Ο οδηγός (magnet rail στις Εικόνες (17)(18)) χρησιμοποιείται για να καθοδηγήσει την συστοιχία των μαγνητών σε ευθεία τροχιά. Συνολικά υπάρχουν τέσσερις μαγνήτες νεοδυμίου που λειτουργούν ως ένας μακρύς κυλινδρικός μαγνήτης με τους πόλους του στην άκρη. Στο κέντρο αυτών τοποθετείται η μία άκρη του επεκτεινόμενου αισθητήρα. Η ταλάντωση δημιουργείται με την εφαρμογή εναλλασσόμενης τάσης στα πηνία που βρίσκονται στις άκρες του οδηγού. Η παροχή τάσης έγινε με το *Hewlett-Packard 8116A* Τα πηνία αυτά έχουν χίλιες (1000) σπείρες το κάθε ένα και η αυτεπαγωγή τους υπολογίσθηκε

σύμφωνα με τη σχέση <sup>(59)</sup>:

$$L = \left(\frac{1}{3}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{R}{2\pi f}\right) \quad (15)$$

Με τη βοήθεια παλμογράφου *Lecroy WaveAce 2034* και γεννήτριας συχνοτήτων υπολογίζεται για τα πηνία:

$$L_{left} = 2.85mH, L_{right} = 3.18mH \quad (16)$$

Η κατασκευή των πηνίων, όντας χειροποίητη, είχε ως αποτέλεσμα οι αυτεπαγωγές τους να είναι διαφορετικές, παρά το γεγονός ότι οι σπείρες είχαν τον ίδιο αριθμό. Αυτό είναι αποτέλεσμα της διαφορετικής κατανομής των σπειρών.

Τα πηνία ήταν αντίστροφα και ως συνέπεια οι πόλοι που δημιουργούν είναι συνεχώς αντίστροφοι. Το αποτέλεσμα ήταν να δημιουργείται δύναμη επαναφοράς που να συντηρεί την ταλάντωση. Επειδή όμως το σύστημα δεν ήταν εντελώς συμμετρικό, υπήρχε κάποια προτίμηση ως προς την φορά της κίνησης. Για αυτόν ακριβώς το λόγο στην άκρη των μαγνητών τοποθετήθηκαν δύο μαγνήτες-φρένα, ένας από κάθε μεριά.

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται με τον κύριο σκοπό να μελετηθεί η συμπεριφορά του αισθητήρα σε συχνότητες όπου ένα συμβατικό ηχείο δε μπορεί να αποκριθεί. Παρέχει μόνο συμπληρωματικά αποτελέσματα.

### **3.2.2 Έλεγχος περιοδικής συμπεριφοράς**

Προτού συνδεθεί ο αισθητήρας, ελέγχθηκε ότι η κίνηση είναι όντως περιοδική, αλλά όχι απαραίτητα και αρμονική (όπως είναι το σήμα που δίνεται) λόγω των τριβών και ανομοιογενειών οι οποίες υπάρχουν. Έτσι, δημιουργήθηκε ένα τρίτο δοκιμαστικό πηνίο, το οποίο τοποθετήθηκε στο κέντρο της συστοιχίας μαγνητών-εμβόλων (Εικόνα 20). Εν συνεχεία, το πηνίο συνδέθηκε με τον παλμογράφο. Όταν το σύστημα τέθηκε σε λειτουργία κάποιο σήμα περιοδικής φύσεως στην οθόνη ήταν το σήμα που θα έπρεπε να



παρατηρηθεί. Η εξήγηση για το περιοδικό σήμα είναι ότι οι κινούμενοι μαγνήτες προκαλούν μία διαφορά στη ροή του μαγνητικού πεδίου με το χρόνο, και αυτό με τη σειρά του επάγει ένα ηλεκτρικό πεδίο που με τη δική του σειρά του κινεί τα ελεύθερα φορτία στο χαλκό του πηνίου. Έτσι δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα, άρα και μία τάση, η οποία αναγράφεται στον παλμογράφο. Είναι δηλαδή <sup>(60)</sup>

$$\oint \mathbf{E} d\mathbf{l} = - \frac{d\Phi}{dt} = E(2\pi s) \quad (17)$$

Όπου  $\mathbf{E}$  το ηλεκτρικό επαγόμενο πεδίο,  $\Phi$  η μαγνητική ροή και  $s$  η ακτίνα του ηλεκτρικού πεδίου.

Επίσης, επειδή το μαγνητικό πεδίο μόνιμων ραβδοειδών μαγνητών είναι παράλληλό με τον κύριο άξονα τους, στο κέντρο τους είναι:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) \quad (18)$$

Δηλαδή ακτινικό, άρα το  $\mathbf{E}$  είναι εφαπτόμενο σε κύκλους ακτίνας  $s$  από το κέντρο των μαγνητών και έτσι, έχοντας πως:

$$\Phi = \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) * \pi s^2 \quad (19)$$

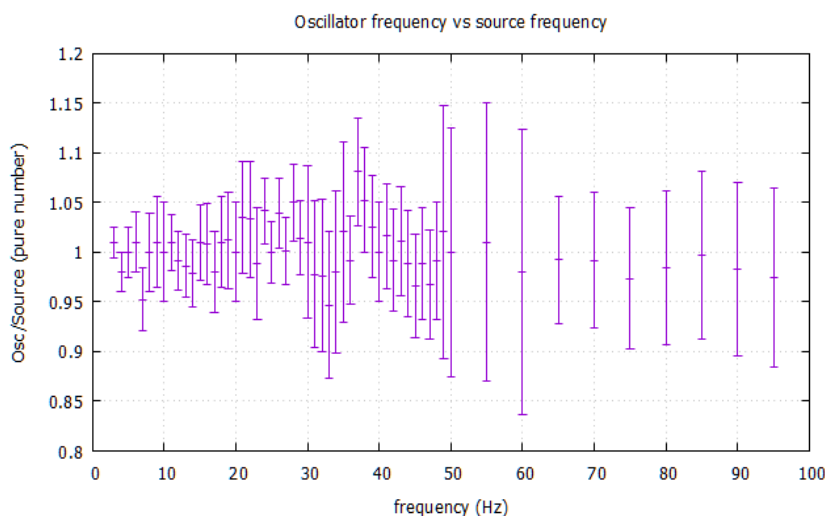
τότε:

$$\mathbf{E} = - \frac{s}{2} \frac{d\mathbf{B}}{dt} \hat{\phi} \quad (20)$$

Για αυτό το  $\mathbf{E}$  αντιστοιχεί κάποιο  $V$  σύμφωνα με τη σχέση

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (21)$$

Η διαφορά φάσης δε είναι σημαντική καθώς μόνο η τιμή της συχνότητας πρέπει να αποκλίνει όσο το δυνατόν λιγότερο από την πηγή.



**Εικόνα 19:** Αποτέλεσμα ελέγχου περιοδικότητας του 3d εκτυπωμένου ταλαντωτή

Το συμπέρασμα είναι πως η διαφορά είναι αρκετά μικρή (ο λόγος του Osc/Source είναι περίπου ένα) και έτσι με αρκετή βεβαιότητα η διεγέρτρια συχνότητα της γεννήτριας ήταν αυτή που κινούταν και ο ταλαντωτής. Η συχνότητα που μετρήθηκε ήταν μέχρι τα 95Hz καθώς μετά από αυτό



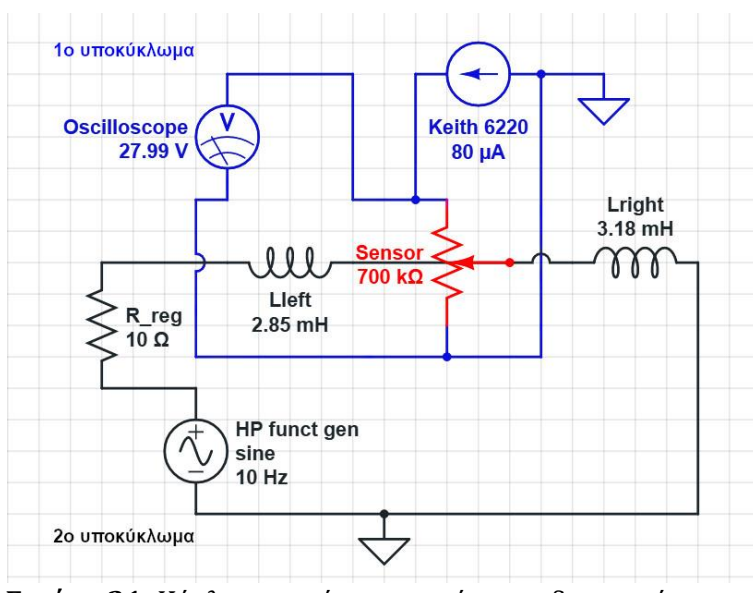
**Εικόνα 20:** Δοκιμαστικό πηνίο για έλεγχο περιοδικής συμπεριφοράς του 3D εκτυπωμένου ταλαντωτή

Τα αποτελέσματα του δοκιμαστικού πειράματος φαίνονται στο επόμενο γράφημα (Εικόνα 19). Ο άξονας Osc/Source δείχνει τον λόγο της συχνότητας του σήματος που κατέγραψε ο παλμογράφος με αυτό που έστειλε η γεννήτρια.

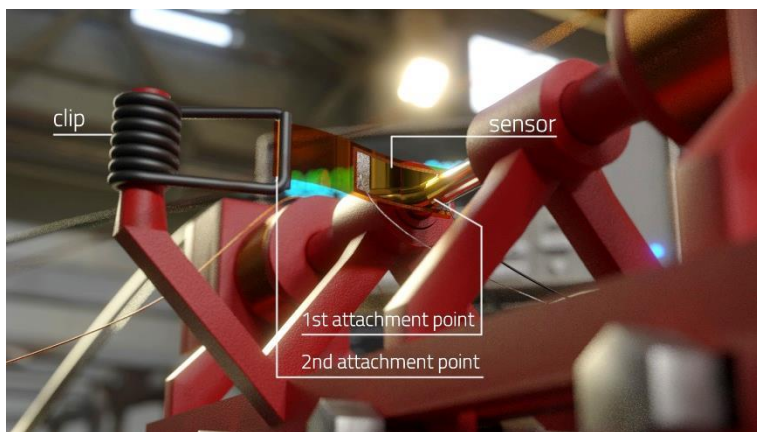
Το συμπέρασμα είναι πως η διαφορά είναι αρκετά μικρή (ο λόγος του Osc/Source είναι περίπου ένα) και έτσι με αρκετή βεβαιότητα η διεγέρτρια συχνότητα της γεννήτριας ήταν αυτή που κινούταν και ο ταλαντωτής. Η συχνότητα που μετρήθηκε ήταν μέχρι τα 95Hz καθώς μετά από αυτό το σημείο η ταλάντωση ήταν τόσο μικρή σε πλάτος που η διαφορά στη ροή του μαγνητικού πεδίου δεν ήταν αρκετή για να δώσει κάποιο σημαντικό μετρήσιμο σήμα. Επίσης, μετά την προσθήκη του πολυϊμιδίου, η μέγιστη συχνότητα μειώνεται περίπου στα 50Hz, λόγω της ανάδρασης του υλικού που λειτουργεί ως φρένο.

### 3.2.3 Συνδεσμολογία πρώτου συστήματος

Επόμενο βήμα ήταν η συνδεσμολογία του συστήματος. Αναφέρθηκε ήδη ότι τα πηνία συνδέονται με την γεννήτρια συχνοτήτων. Επιπροσθέτως, το όλο κύκλωμα είναι σε σειρά, με μία μικρή αντίσταση. Έτσι η ένταση του ρεύματος είναι ίδια και στα δύο πηνία και χρειάζεται αρκετή για να παραχθούν ισχυρά μαγνητικά πεδία. Το επόμενο σχήμα δείχνει το κύκλωμα (Εικόνα 21, 2<sup>ο</sup> υποκύκλωμα).



**Εικόνα 21:** Κύκλωμα πρώτου συστήματος δυναμικής μελέτης

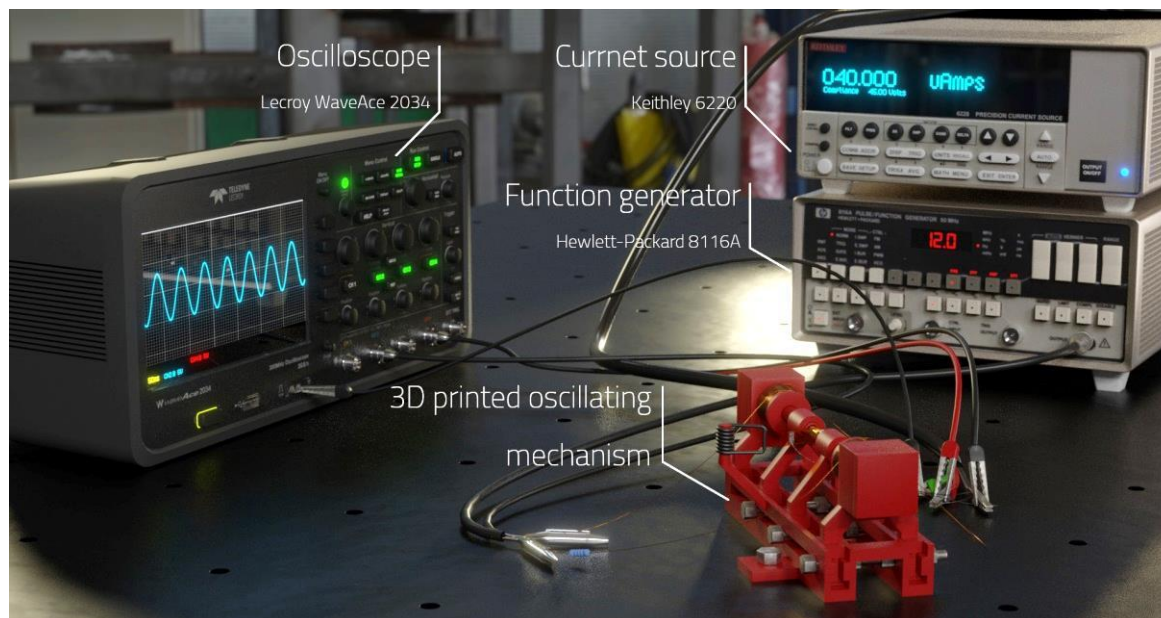


**Εικόνα 22:** Σύνδεση του αισθητήρα στον 3D εκτυπωμένο μηχανισμό

Ο αισθητήρας συνδέθηκε με τον εξής τρόπο: Η μία άκρη του υποστηρικτικού πολυϊμιδίου ασφαλίστηκε στον συνδετήρα του μηχανισμού, και η δεύτερη στο μέσο των μαγνητών-εμβόλων (Εικόνα 22).

Τονίζεται πως αν δεν επεκτεινόταν το υπόστρωμα του αισθητήρα, αλλά το πραγματικό άκρο του χρησιμοποιούταν ως το ακλόνητο σημείο, τότε το φάσμα συχνοτήτων που θα μπορούσε να μετρηθεί θα ήταν σαφέστερα πιο στενό. Αυτό θα συνέβαινε καθώς η μεγαλύτερη παραμόρφωση θα δυσκόλευε την κίνηση των μαγνητών προβάλλοντας μεγαλύτερη

μηχανική αντίσταση. Επιπλέον, ένας δεύτερος παράγοντας που θα μείωνε το πλάτος ταλάντωσης, είναι ο συνδετήρας. Επειδή αποτελείται από μαγνητικό υλικό, αλληλεπιδρά με τους μαγνήτες-έμβολα και επομένως δημιουργείται μια δύναμη απόσβεσης.



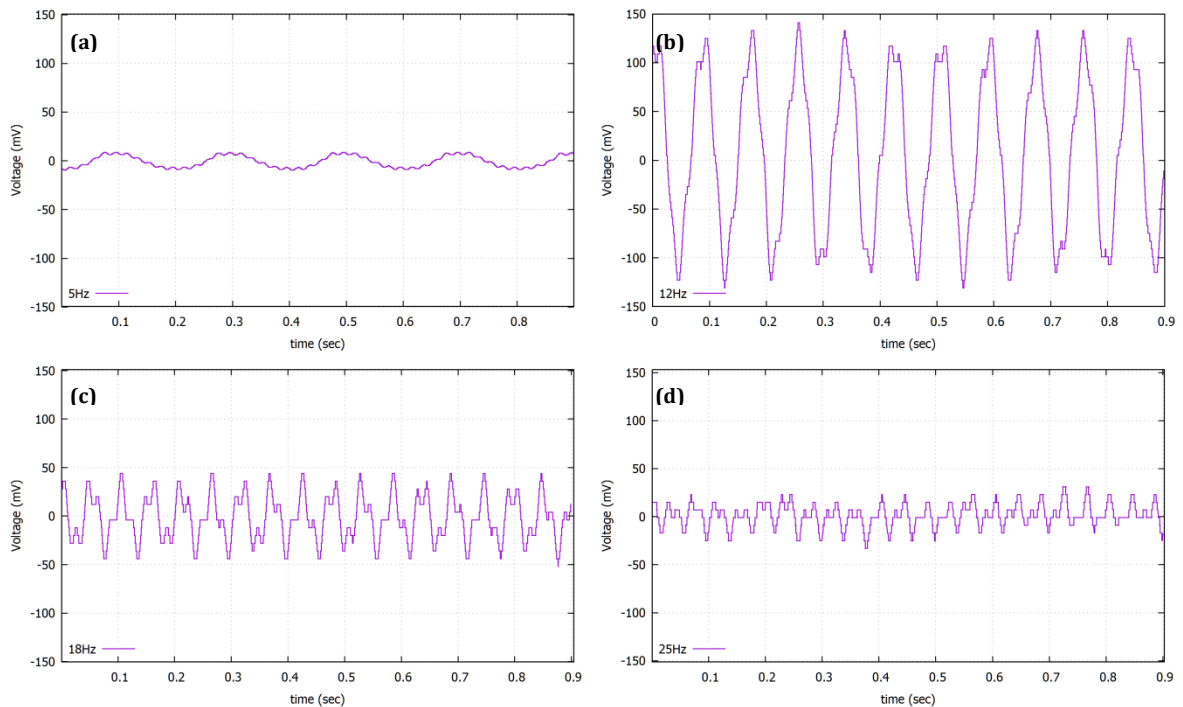
**Εικόνα 23:** Συνολική διάταξη πρώτου συστήματος δυναμικής μελέτης

Η τροφοδοσία παρέχεται από μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος Keithley 6220 <sup>(61)</sup> η οποία συνδέθηκε παράλληλα με ψηφιακό παλμογράφο (Εικόνα 21, 1<sup>ο</sup> υποκύκλωμα). Ο λόγος που επιλέχθηκε παροχή σταθερού ρεύματος και όχι τάσης, είναι ώστε με ένα όσο το δυνατόν πιο απλό κύκλωμα να διαβαστεί μεταβολή τάσης, για κάποια μεταβολή στην αντίσταση. Η συνολική διάταξη παρουσιάζεται στην Εικόνα 23.

### **3.2.4 Εκτέλεση και Αποτελέσματα του πρώτου συστήματος**

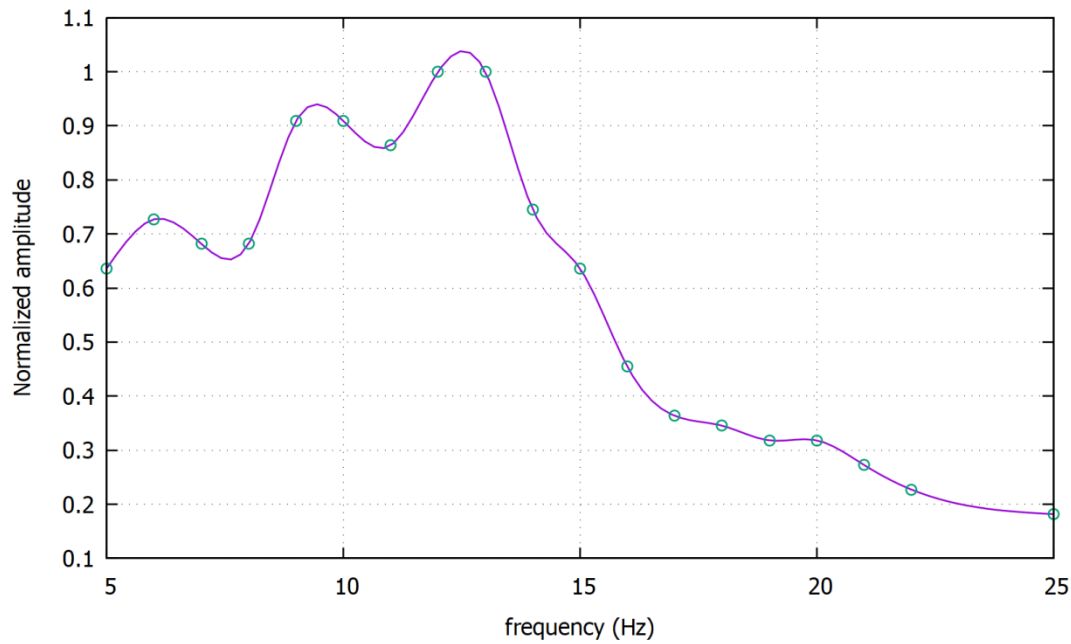
Οι μετρήσεις άρχισαν ρυθμίζοντας τη γεννήτρια συχνοτήτων ώστε να παρέχει σταθερή παλινδρόμηση στους μαγνήτες-έμβολα. Η φυσική ταλάντωση του συστήματος ήταν περίπου στα 12Hz και εκεί παρατηρήθηκαν τα μεγαλύτερα πλάτη ταλάντωσης. Με αυτό το βήμα ολοκληρωμένο, ενεργοποιήθηκε η παροχή σταθερού ρεύματος στον αισθητήρα, 40μΑ.

Μετρήθηκε ένα εύρος από 5-25Hz. Περισσότερο από αυτό το εύρος οι μετρήσεις ήταν αναξιόπιστες. Παρακάτω παρατίθενται μερικά διαγράμματα για διάφορες συχνότητες (Εικόνα 24). Εύκολα συμπεραίνει κανείς ότι η περιοδική κίνηση των μαγνητών μεταφράζεται σε εξίσου συνεπή περιοδική μεταβολή στην αντίσταση του αισθητήρα και συνεπώς στην τάση που διαβάζει ο παλμογράφος. Ο αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το πείραμα ήταν ο 2 με G factor 7.3-13.3.



**Εικόνα 24:** Ταλαντωτικές συμπεριφορές για διαφορετικές συχνότητες πρώτου τρόπου ταλάντωσης **(a):** 5Hz, **(b):** 12Hz, **(c):** 18Hz, **(d):** 25Hz. *Sensor 2, GF=7.3* Παρατηρείται καλή περιοδική συμπεριφορά σε όλο το εύρος συχνοτήτων.

Επιπρόσθετα με τα γραφήματα διαφορετικών συχνοτήτων (Εικόνα 24), σχηματίστηκε γράφημα που απεικονίζει το πλάτος της ταλάντωσης σε συνάρτηση με την αντίστοιχη συχνότητα (Εικόνα 25). Από αυτό γίνεται αντιληπτό ότι ο μηχανισμός διέγερσης συντονίζεται περίξ των 12Hz και έπειτα από αυτό μειώνεται απότομα μέχρι το σημείο που δεν είναι πλέον ευδιάκριτη η ταλάντωση.



**Εικόνα 25:** Κανονικοποιημένο πλάτος ταλάντωσης για εύρος συχνοτήτων από 5-25Hz για τον πρώτο τρόπο ταλάντωσης (Αισθητήρας 2 GF =7.3). Η προσαρμογή της πολυωνυμικής καμπύλης έγινε για να είναι πιο ευανάγνωστο το γράφημα.

Στη συνέχεια έγινε μια εκτίμηση για την παραμόρφωση  $\Delta l$  του αισθητήρα. Εκμεταλλευόμενοι το γράφημα εξάρτησης αντίστασης από την παραμόρφωση  $\varepsilon$  (Εικόνα 15(b), sensor 2) με επιλεγμένη την συχνότητα των 10Hz και χρησιμοποιώντας το γράφημα της Εικόνας 26 υπολογίζεται το  $\Delta R/R$ . Έτσι από το νόμο του Ohm είναι:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta V}{V} \quad (22)$$

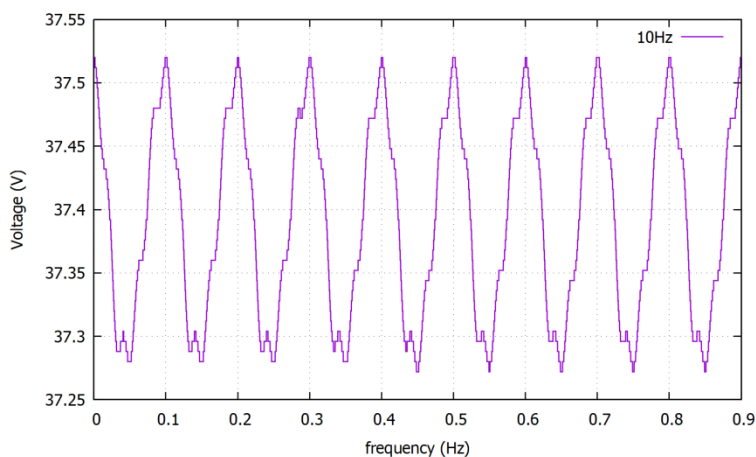
Άρα

$$\frac{\Delta R}{R} = GF \cdot \varepsilon \quad (23)$$

$$(22) = \frac{37.52 - 37.40}{37.40} = 3.21 \cdot 10^{-3}$$



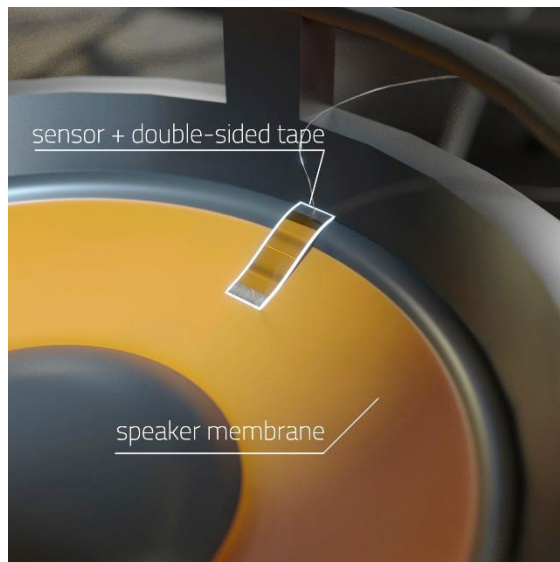
Ανατρέχοντας στο αντίστοιχο γράφημα (Εικόνα 15(b), sensor 2)βρίσκεται ότι για αυτή τη διαφορά στην αντίσταση, αντιστοιχεί ένα  $\varepsilon=0.00044=0.044\%$



**Εικόνα 26:** Μεταβολή τάσης στα 10Hz με την πρώτη μέθοδο ταλάντωσης

### 3.2.5 Συνδεσμολογία δεύτερου συστήματος

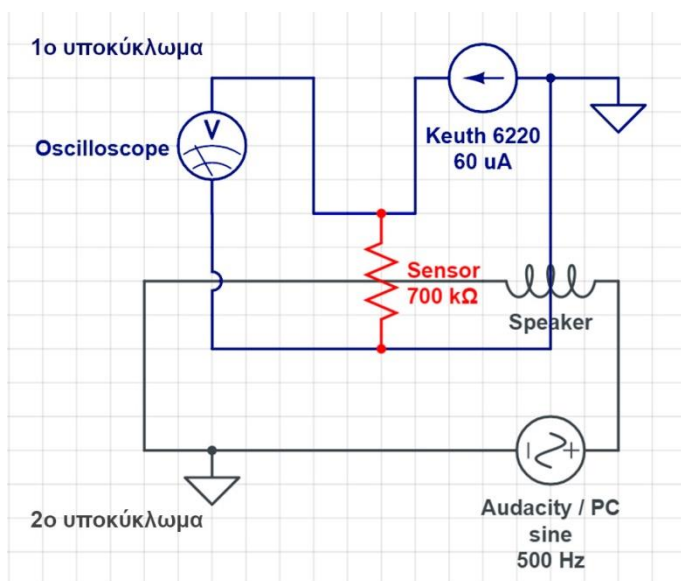
Η δεύτερη διάταξη επιτάσσεται για τη μελέτη συχνοτήτων στο ακουστικό φάσμα. Η καλύτερη επιλογή για παραγωγή τέτοιων συχνοτήτων είναι ένα ηχείο. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου έγκειται, αρχικά, ευρύ φάσμα συχνοτήτων που μπορεί να μετρηθεί και επιπλέον στο ότι τα διεγείροντα σήματα δύναται να είναι περισσότερα από ένα. Από την άλλη όμως, στις υψηλότερες συχνότητες οι παραμορφώσεις είναι πολύ μικρές και καθίσταται δύσκολη η παρακολούθησή τους.



**Εικόνα 27:** Εφαρμογή του αισθητήρα στη μεμβράνη του ηχείου

Η προσαρμογή του αισθητήρα έπρεπε να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να αξιοποιηθεί στο μέγιστο η ταλάντωση της μεμβράνης. Επομένως, ασφαλίστηκε το ένα άκρο στο χείλος του ηχείου, που μεταβάλλεται ελάχιστα

έως καθόλου σε σχέση με τη μεμβράνη και το δεύτερο σε αυτή (Εικόνα 27). Εάν η τοποθέτηση γινόταν στην επιφάνεια της μεμβράνης, τότε η μετατόπιση της δε θα προκαλούσε καμία παραμόρφωση στον ανιχνευτή καθώς όλο το σώμα του αισθητήρα θα μετακινούταν μαζί με τη μεμβράνη. Ο ανιχνευτής τοποθετήθηκε ήδη παραμορφωμένος στην κατάσταση ηρεμίας του, διότι, είναι γνωστό ότι σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις, οι αισθητήρες νανοσωματιδίων επιδεικνύουν υψηλότερη ευαισθησία. Η σύνδεση έγινε με τη χρήση διπλοκολλητικής ταινίας (Akasa Double-Sided thermal conductive adhesive tape <sup>(62)</sup>). Πρόκειται για ισχυρή ταινία που παρείχε πολύ ικανοποιητική σύνδεση μεταξύ μεμβράνης και αισθητήρα. Χρειάζεται η κόλληση να είναι όσο το δυνατόν ισχυρότερη καθώς πρέπει να παρακολουθείται η μετατόπιση της μεμβράνης όσο πιο πιστά γίνεται. Σε αντίθετη περίπτωση θα χανόταν σήμα, ιδίως στις χαμηλότερες συχνότητες που το ηχείο αναπτύσσει μεγάλα πλάτη ταλάντωσης.



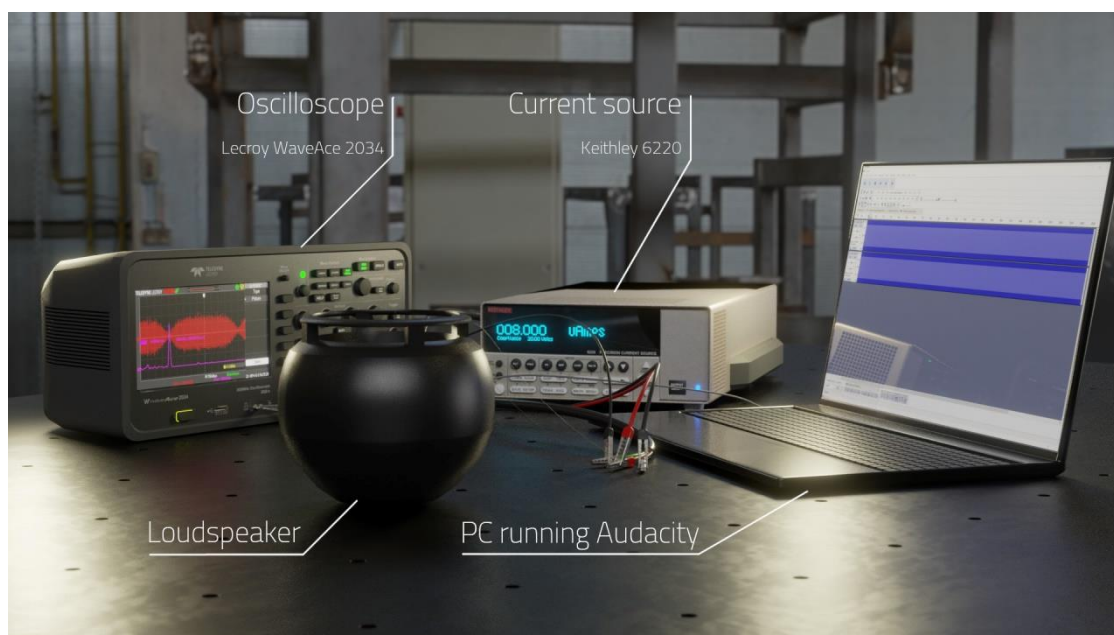
**Εικόνα 28:** Συνδεσμολογία δεύτερου τρόπου δυναμικής μελέτης

Η συνδεσμολογία ήταν μια απλή προσαρμογή του προηγούμενου κυκλώματος με τη μόνη διαφορά ότι το σήμα του διεγέρτη παρέχονταν από υπολογιστή, μέσω του προγράμματος Audacity 3.0.4 <sup>(63)</sup> και του προγράμματος της σελίδας *meettechnik.info* και όχι της γεννήτριας συχνοτήτων. Πλεονέκτημα αυτού ήταν η δυνατότητα διέγερσης του ηχείου με περισσότερες από μία συχνότητες και η μελέτη πιο περίπλοκων συμπεριφορών.

Επειδή να μετρηθεί η συχνότητα του συστήματος στο πεδίο του χρόνου ήταν πρακτικά αδύνατο, χρησιμοποιήθηκε κατά κόρον η λειτουργία του παλμογράφου να εκτελεί γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (FFT) σε πραγματικό χρόνο. Αυτός ο αλγόριθμος μετατρέπει το σήμα από το χώρο του χρόνου, στο χώρο των συχνοτήτων. Αυτό σημαίνει



πως δύναται να μελετηθεί η ένταση και συχνότητα των διαφορετικών ημιτόνων που απαρτίζουν το σήμα.



**Εικόνα 29:** Συνολική διάταξη δεύτερου συστήματος δυναμικής μελέτης

### ***3.2.6 Εκτέλεση και Αποτελέσματα δεύτερου συστήματος***

Σε αυτό το σύστημα μελετήθηκαν δύο ειδών αισθητήρες, με αλουμίνα και χωρίς ή αλλιώς «απλούς». Οι υπό μελέτη αισθητήρες ήταν οι 3 («απλός»), 2a (alumina) και 3a (alumina). Το σήμα των αισθητήρων αλουμίνας αναμένεται εν τέλει να είναι πολύ ισχυρότερο λόγω της πολύ μεγαλύτερης ευαισθησίας τους. Δοκιμές εκτελέστηκαν σε χαμηλή και υψηλή τάση, καθώς και σε φάσμα συχνοτήτων για να παρατηρηθεί η απόκριση.

Πρώτα επιλέχθηκε η τάση ηρεμίας που ήταν επιθυμητή. Αυτό σημαίνει πως για μηδενικό σήμα, η πηγή σταθερού ρεύματος ρυθμίστηκε κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αντιστοιχεί σε

μία σταθερή τιμή τάσης στον παλμογράφο. Συνεπώς για διαφορετικούς αισθητήρες, η τιμή ρεύματος ήταν διαφορετική ανάλογα με την αντίσταση του καθενός. Οι τιμές που επιλέχθηκαν για τις μετρήσεις ήταν 16V (υψηλή τάση) και 2V (χαμηλή τάση). Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην τάση κατωφλίου (compliance voltage) της πηγής ρεύματος να είναι σε τέτοιο επίπεδο ώστε να υποστηρίζει τις αλλαγές στην τάση που θα επιφέρουν οι δονήσεις. Η πηγή ρεύματος θεωρητικά δεν έχει επίδραση στο σήμα που θα εμφανιστεί στον παλμογράφο καθώς σύμφωνα με τη σχέση (23) δε φαίνεται να υπεισέρχεται μέσα στον υπολογισμό. Παρόλα αυτά, η βασική αντίσταση των αισθητήρων έχει σημασία, αφού μπορεί να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα σχετικά με την σχέση αυτής με τον μετρητικό παράγοντα GF.

### **3.2.6α Ισχύς σήματος αισθητήρων ως συνάρτηση της έντασης του υπολογιστή**

Στη συνέχεια μετρήθηκε η τάση  $V_{RMS}$  για συγκεκριμένες συχνότητες σε συνάρτηση με την ένταση του υπολογιστή. Η κλίμακα έντασης είναι αυθαίρετη και χρησιμοποιήθηκε σύμφωνα με τον τρόπο που έχει οριστεί στο λογισμικό των Windows 10.

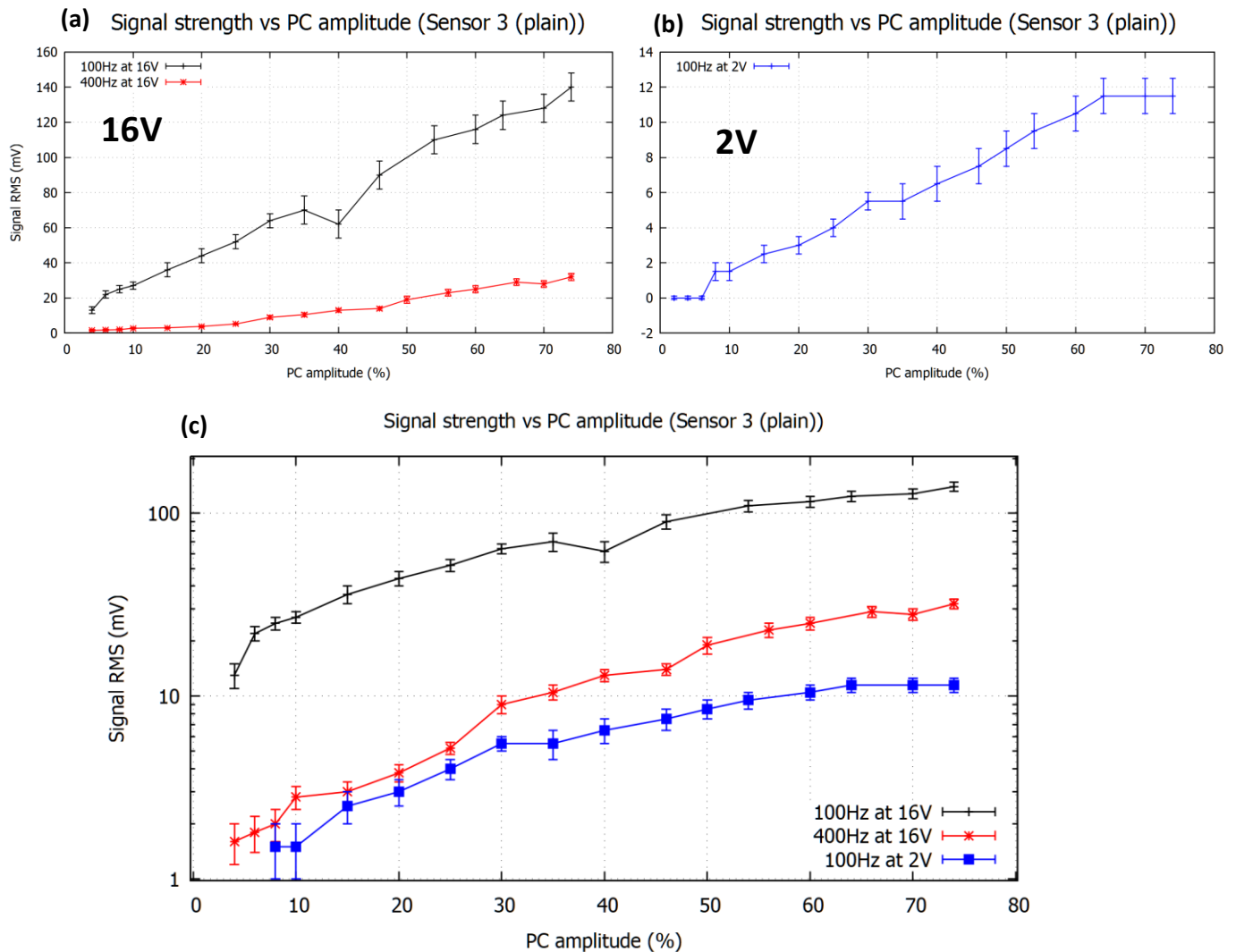
Στα γραφήματα (Εικόνες 30-32) εμφανίζεται η ένταση του σήματος που παράγουν οι αισθητήρες όταν το σήμα διέγερσης που παρέχεται από τον υπολογιστή μεταβάλλεται σύμφωνα με την κλίμακα που έχει οριστεί.

Η καμπύλη των 100Hz δίνει πολύ πιο ισχυρό σήμα από αυτή των 400Hz Αυτό οφείλεται στο εντονότερο πλάτος ταλάντωσης του ηχείου που μεταφράζεται σε μεγαλύτερο  $\varepsilon$  στον αισθητήρα. Μέσω της λογαριθμικής κλίμακας συμπεραίνεται πως από τα 100Hz στα 400Hz ο λόγος της έντασης είναι περίπου 8-10 φορές χαμηλότερος.

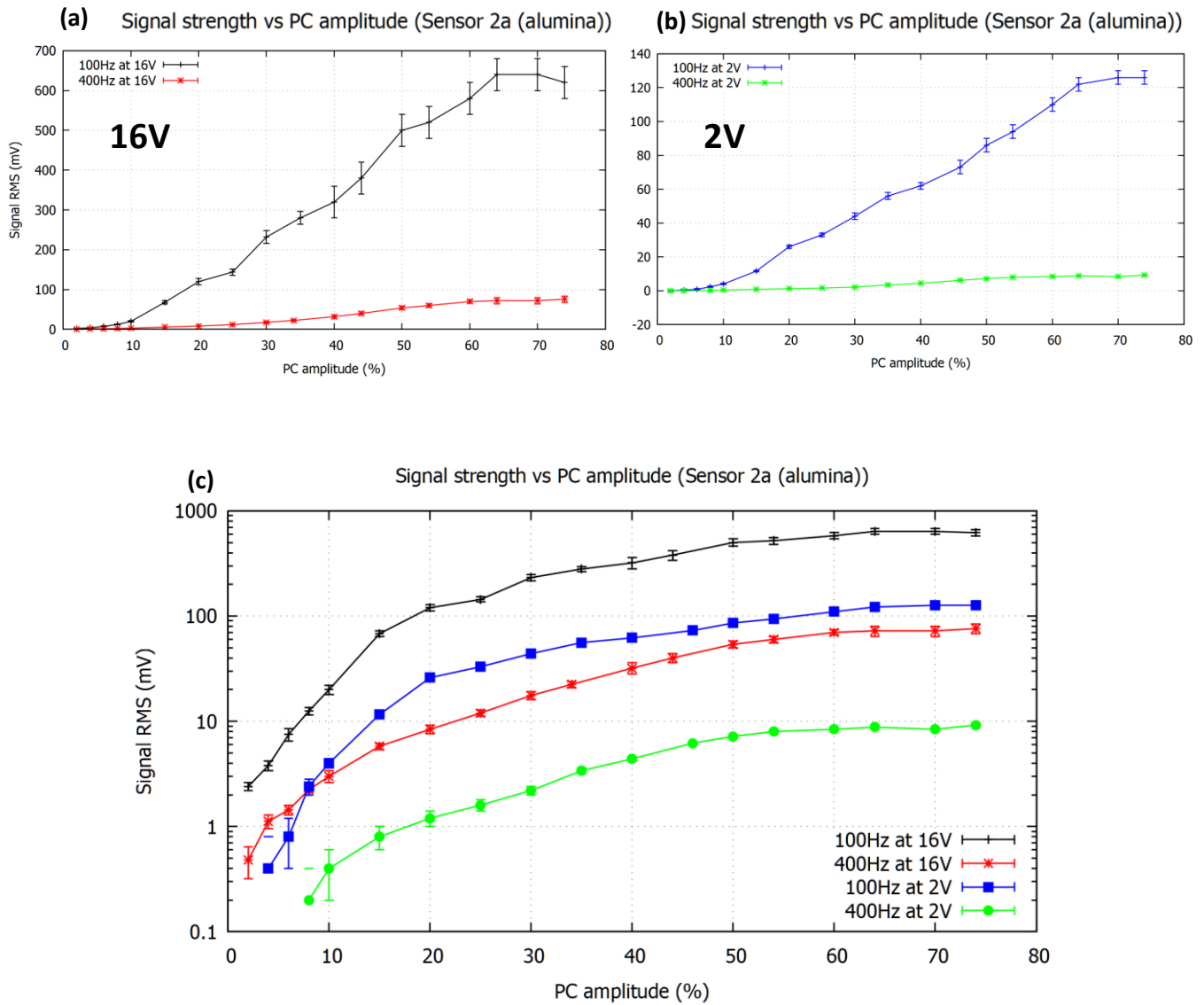
Επίσης παρατηρείται η διαφορά που προκαλεί η αλλαγή στην τάση ηρεμίας του κυκλώματος. Τα λογαριθμικά διαγράμματα (Εικόνες 30(c)-32(c)) δείχνουν μια παρόμοια συμπεριφορά σε όλους τους αισθητήρες, ανεξαρτήτως επίστρωσης αλουμίνιας. Όπως άλλωστε παρουσιάζεται από τα διαγράμματα που αναφέρθηκαν, μειώθηκε η τάση κατά ένα παράγοντα 8. Ταυτόχρονα η πτώση στην ένταση δεν είναι η ίδια σε όλους τους αισθητήρες. Ο αισθητήρας 3 παρουσίασε πτώση σήματος ~12 φορές, ο 2a ~6 φορές και

ο 3α ~7 φορές. Σύμφωνα με τη σχέση (22), έχοντας σταθερή την  $\Delta R/R$  θα πρέπει να παραμείνει σταθερή και η  $\Delta V/V$ , όμως κάτι τέτοιο δε παρατηρήθηκε.

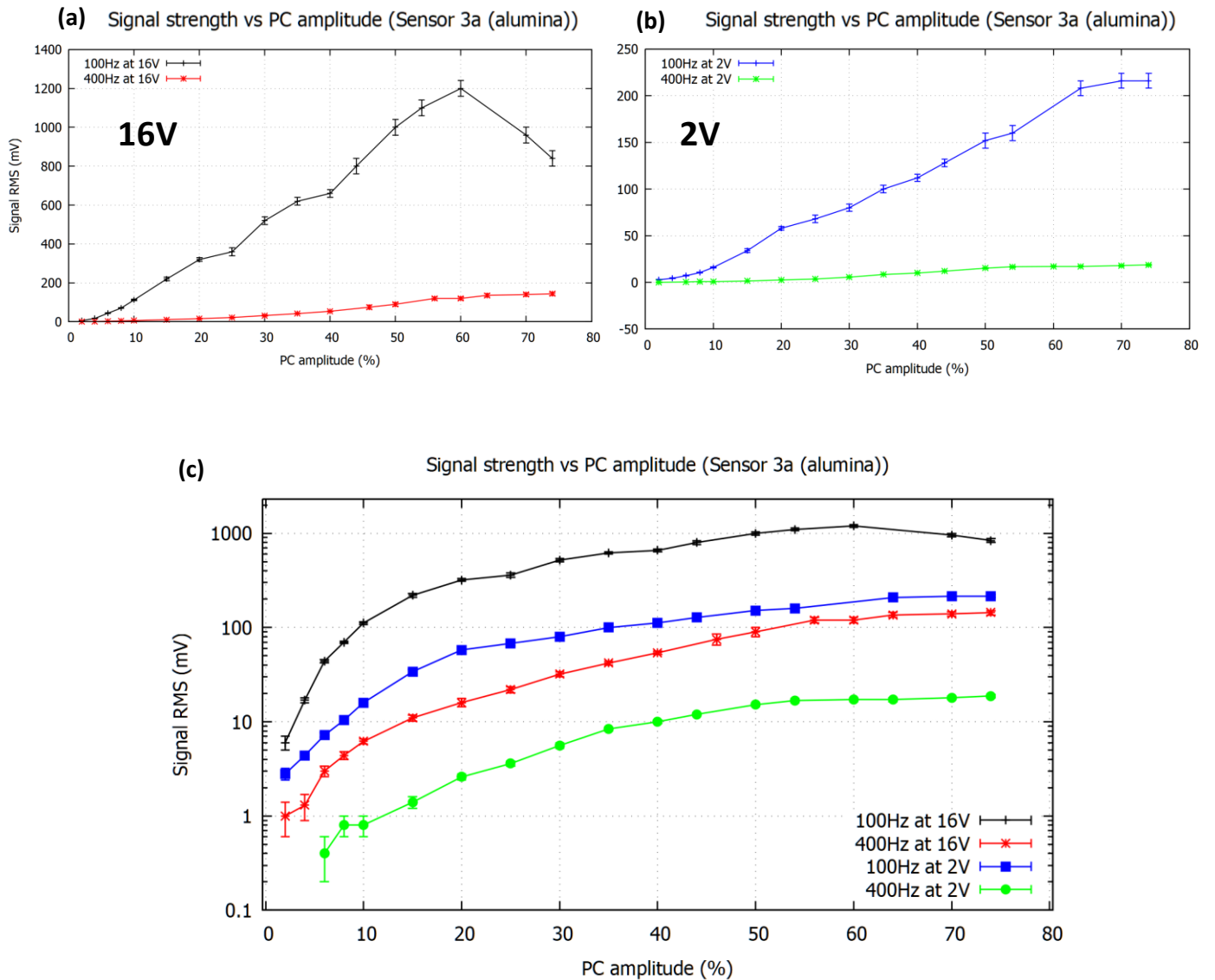
Στον «απλό» αισθητήρα 3 στα 2 Volt και 400Hz (Εικόνα 30 (b)) δεν υπήρξε κάποιο σήμα. Αυτό είναι απόρροια της χαμηλής ευαισθησίας του μαζί με τον αυξημένο ηλεκτρικό θόρυβο που επιδείκνυαν όλοι οι «απλοί» αισθητήρες.



**Εικόνα 30:** Διαγράμματα έντασης σήματος του αισθητήρα 3 ("απλός") με του υπολογιστή στα 100 και 400Hz ως σήμα εισόδου **(a)**: Τάση ηρεμίας κυκλώματος: 16V **(b)**: Τάση ηρεμίας: 2V **(c)**: Λογαριθμική κλίμακα για σύγκριση εντάσεων του αισθητήρα στις διάφορες καταστάσεις τάσης και συχνότητας

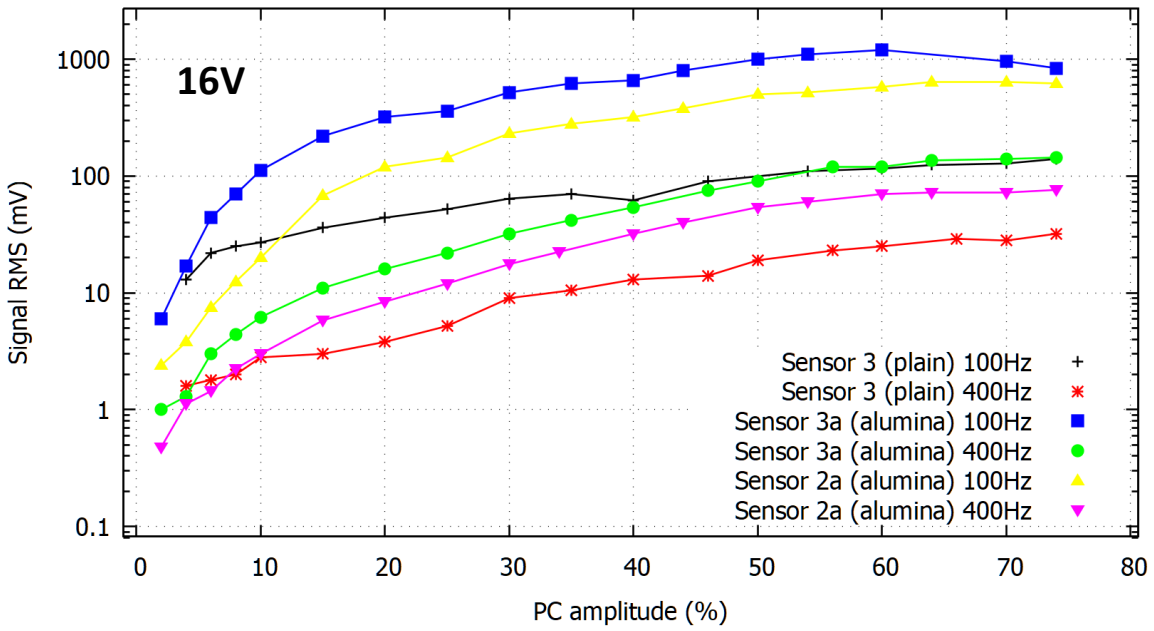


**Εικόνα 31:** Διαγράμματα έντασης σήματος του αισθητήρα 2a (αλουμίνα) με του υπολογιστή στα 100 και 400Hz ως σήμα εισόδου **(a)**: Τάση ηρεμίας κυκλώματος: 16V **(b)**: Τάση ηρεμίας: 2V **(c)**: Λογαριθμική κλίμακα για σύγκριση εντάσεων του αισθητήρα στις διάφορες καταστάσεις τάσης και συχνότητας

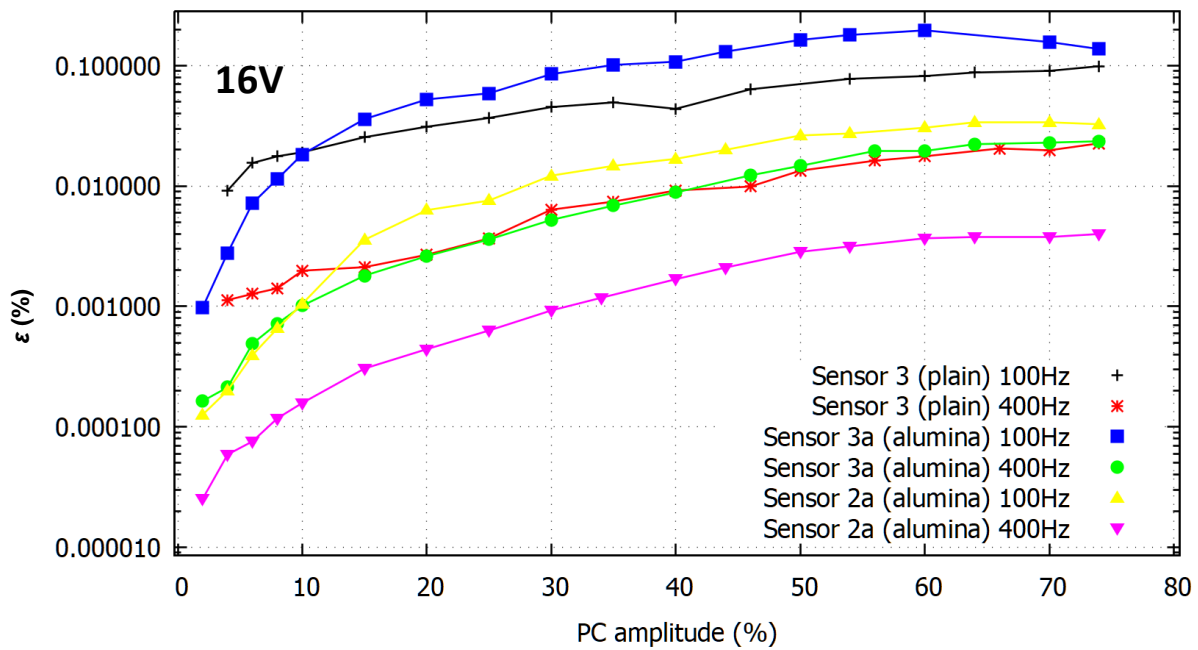


**Εικόνα 32:** Διαγράμματα έντασης σήματος του αισθητήρα 3a (αλουμίνα) με του υπολογιστή στα 100 και 400Hz ως σήμα εισόδου **(a):** Τάση ηρεμίας κυκλώματος: 16V **(b):** Τάση ηρεμίας: 2V **(c):** Λογαριθμική κλίμακα για σύγκριση εντάσεων του αισθητήρα στις διάφορες καταστάσεις τάσης και συχνότητας

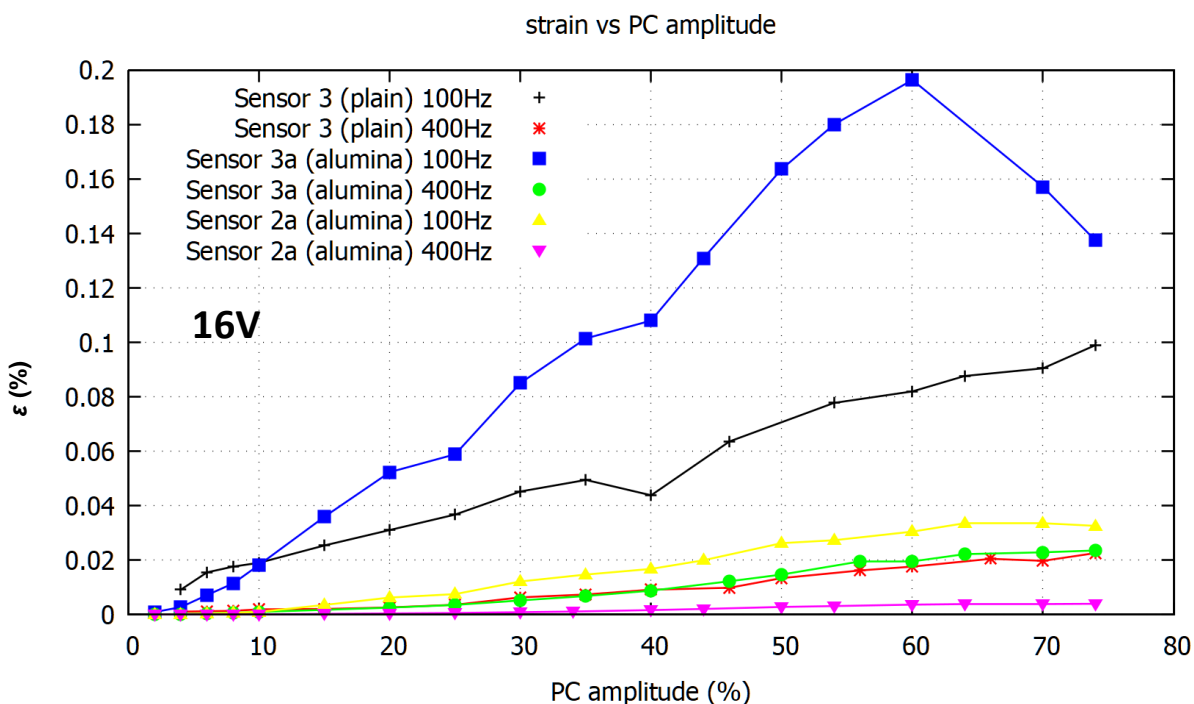
(a) Signal strength vs PC amplitude



(b) strain vs PC amplitude



(c)



**Εικόνα 33:** (a): Ένταση σημάτων των διαφορετικών αισθητήρων σε συχνότητες 100 και 400Hz (b): Παραμόρφωση των αισθητήρων για τις προηγούμενες συχνότητες (Λογαριθμική κλίμακα) (c): Παραμόρφωση των αισθητήρων για τις προηγούμενες συχνότητες (Γραμμική κλίμακα)

Στην Εικόνα 33(a) μελετάται η απόκριση μεταξύ των αισθητήρων. Διακρίνεται πως οι αισθητήρες με αλουμίνα όντας πολύ πιο ευαίσθητοι στις παραμορφώσεις, δίνουν πολύ ισχυρότερο σήμα από τους απλούς ~10 φορές ισχυρότερο. Για ένταση του υπολογιστή από 64% και άνω, το ηχείο δεν παρουσίασε αισθητή διαφορά στην ένταση του ήχου και για αυτό δεν υπάρχουν σοβαρές διαφορές στα σήματα των αισθητήρων.

Οι Εικόνες 33(b)/(c) δημιουργούνται από την Εικόνα 33(a) με τον εξής μετασχηματισμό:

$$\varepsilon = 100 * \left( \frac{\sqrt{2}V_{RMS}}{GF * 1000} \right) \quad (24)$$

Όπου  $\varepsilon$  η παραμόρφωση,  $\sqrt{2}V_{RMS}$  σε mV, η τάση κορυφής και  $GF$  ο μετρητικός παράγοντας. Ο παράγοντας 100 εισάγεται για να μετατραπεί το  $\varepsilon$  σε ποσοστιαία μονάδα, και ο παράγοντας 1000 για να μετατραπεί η τάση σε Volts.

Χρησιμοποιώντας τις Εικόνες 33(b)/(c) καταλήγουμε πως οι αισθητήρες 3 και 3a έχουν λόγο:

$$\frac{\varepsilon_{S3a}}{\varepsilon_{S3}} \cong 2.3 \quad (25)$$

Έτσι λαμβάνει κανείς πληροφορία για την απόδοση των αισθητήρων. Επειδή το ηχείο παραμορφώνεται το ίδιο για συγκεκριμένη συχνότητα, θα πρέπει, στην ιδανική περίπτωση, οι λόγοι των παραμορφώσεων να είναι μονάδα. Κάτι τέτοιο δε παρατηρείται. Αυτό είναι αποτέλεσμα του διαφορετικού φυσικού μεγέθους των ηλεκτροδίων χρυσού των αισθητήρων που έκαναν αδύνατη την πανομοιότυπη τοποθέτηση τους στη μεμβράνη. Επίσης υπήρχε φυσικό όριο στην ακρίβεια τοποθέτησης των αισθητήρων μιας και δεν υπήρχε διαθέσιμος εξειδικευμένος μηχανισμός. Επομένως η απόδοση ενός ανάλογου αισθητήρα "3", δηλαδή ενός αισθητήρα νανοσωματιδίων με ίδιο μετρητικό παράγοντα με αυτόν του αισθητήρα 3, ωστόσο με πιο κατάλληλα φυσικά χαρακτηριστικά, μπορεί να βελτιωθεί τουλάχιστον κατά 2.3 φορές. Με την ίδια διαδικασία υπολογίζεται και ο λόγος μεταξύ των αισθητήρων 3a, και 2a. Αυτή τη φορά είναι:

$$\frac{\varepsilon_{S3a}}{\varepsilon_{S2a}} \cong 6.2 \quad (26)$$

Άρα υπάρχει περιθώριο βελτίωσης τουλάχιστον 6.2 φορές στην απόδοση ενός ανάλογου αισθητήρα "2a".

Για να επιβεβαιωθεί αυτή η υπόθεση, θα συγκρίνουμε τους λόγους των γραφημάτων (Εικόνες 33(a)/(b)) και θα πρέπει να δώσουν παρόμοια αποτελέσματα. Άρα χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (10) και (22), είναι



$$\frac{\Delta V_{S3a}}{\Delta V_{S3}} \cong 10 \quad (27)$$

Και

$$\frac{\varepsilon_{S3a} GF_{S3a}}{\varepsilon_{S3} GF_{S3}} = 9.89 \quad (28)$$

Τα αποτελέσματα των (27) και (28) είναι παραπλήσια άρα έγινε σωστή εκτίμηση. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τον δεύτερο λόγο των αισθητήρων 3a και 2a.

$$\frac{\Delta V_{S3a}}{\Delta V_{S2a}} \cong 2.06 \ \& \ \frac{\varepsilon_{S3a} GF_{S3a}}{\varepsilon_{S2a} GF_{S2a}} = 2.00 \quad (29)$$

Και σε αυτή την περίπτωση Όπου 2.06 ο λόγος των εντάσεων των αισθητήρων 3a και 2a όπως υπολογίζονται από την Εικόνα 33(a). Ιδιαίτερα για τον αισθητήρα 2a η βελτίωση προσαρμογής ώστε να ενισχυθεί η απόδοση του είναι δύσκολη λόγω του φυσικού μήκους του υποστρώματος του που είναι μακρύτερο από των άλλων.

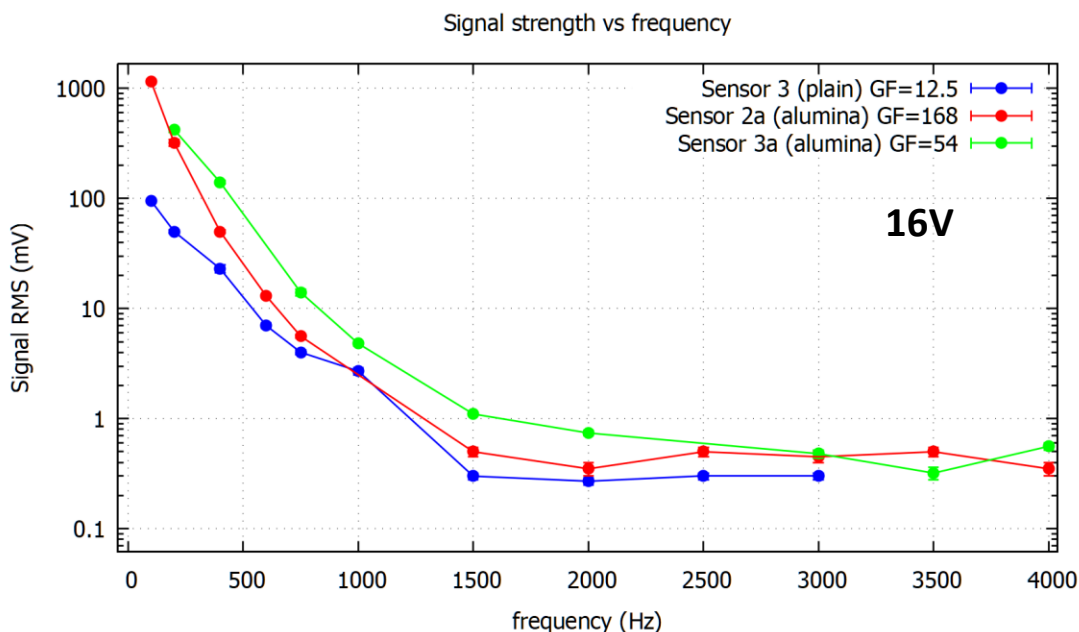
### **3.2.6β Εύρεση πλήρους φάσματος συχνοτήτων**

Στο δεύτερο υποπείραμα, η αντίδραση του αισθητήρα καταγράφηκε για ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Επειδή έπειτα από κάποιο όριο (~4000HZ) η παραμόρφωση του ηχείου ήταν πολύ μικρή και σε συνάρτηση με τις απώλειες ενέργειας λόγω ατελειών στη σύνδεση με το ηχείο, ήταν αδύνατο να ληφθεί κάποιο χρήσιμο σήμα. Αυτό το όριο ήταν με κάποιες αποκλίσεις ίδιο για τους αισθητήρες που δοκιμάστηκαν, ασχέτως ευαισθησίας.

Η Εικόνα 34 παρουσιάζει το σήμα που μετρήθηκε από τον παλμογράφο για το εύρος συχνοτήτων που αναφέρθηκε.

Μπορεί να καταλάβει κανείς ότι παρόμοια συμπεριφορά επιδεικνύουν και οι τρεις αισθητήρες που δοκιμάστηκαν. Αυτό είναι απόρροια της μειούμενης εκτόπισης της

μεμβράνης του ηχείου με την αύξηση της συχνότητας. Οι διαφορετικοί μετρητικοί παράγοντες ευθύνονται για το διαφορετικό σήμα.



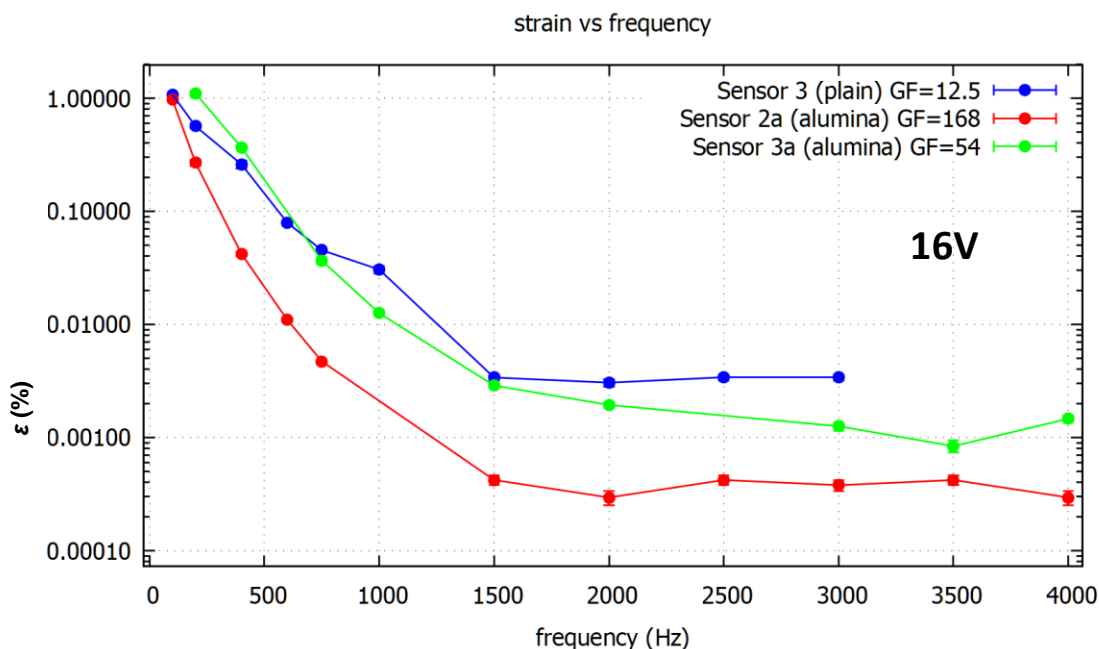
**Εικόνα 34:** Εξάρτηση σήματος των αισθητήρων 3, 2a, 3a από τη συχνότητα (Λογαριθμική κλίμακα)

Έπειτα προσαρμόστηκε καμπύλη της μορφής  $\sim 1/x^2$  σε κάθε σεντ πειραματικών σημείων (Πίνακας 4) Η  $f(x)$  δίνει αποτέλεσμα σε mV ενώ το  $x$  δέχεται τιμές με μονάδες συχνότητας. Ο συντελεστής στον αριθμητή έχει μονάδες mVHz<sup>2</sup> και ο προσθετικός όρος mV.

**Πίνακας 4:** Προσαρμοσμένες συναρτήσεις στα πειραματικά σημεία των αισθητήρων (Εικόνα 34)

Αισθητήρας	G factor	Προσαρμοσμένη συνάρτηση $f(x)$
3 («απλός»)	12.5	$f_3(x) = \frac{9.573 * 10^5}{x^2} + 5.097$
2a (αλουμίνα)	168	$f_{2a}(x) = \frac{1.161 * 10^7}{x^2} - 4.423$
3a (αλουμίνα)	54	$f_{3a}(x) = \frac{1.717 * 10^7}{x^2} - 2.058$

Στη συνέχεια, κατασκευάστηκε αντίστοιχο γράφημα της παραμόρφωσης σε σχέση με τη συχνότητα (Εικόνα 35), όπως και στο υποπείραμα 5.2.6α. Για αυτό το γράφημα προσαρμόστηκαν καμπύλες με την ίδια μορφή  $\sim 1/x^2$  με τη διαφορά ότι η  $g(x)$  έχει ως



**Εικόνα 35:** Εξάρτηση παραμόρφωσης των αισθητήρων 3, 2a, 3a από τη συχνότητα (Λογαριθμική κλίμακα)

αποτέλεσμα καθαρό αριθμό. Ακόμα ο συντελεστής στον αριθμητή έχει μονάδες  $\text{Hz}^2$  και ο προσθετικός όρος είναι καθαρός αριθμός (Πίνακας 5).

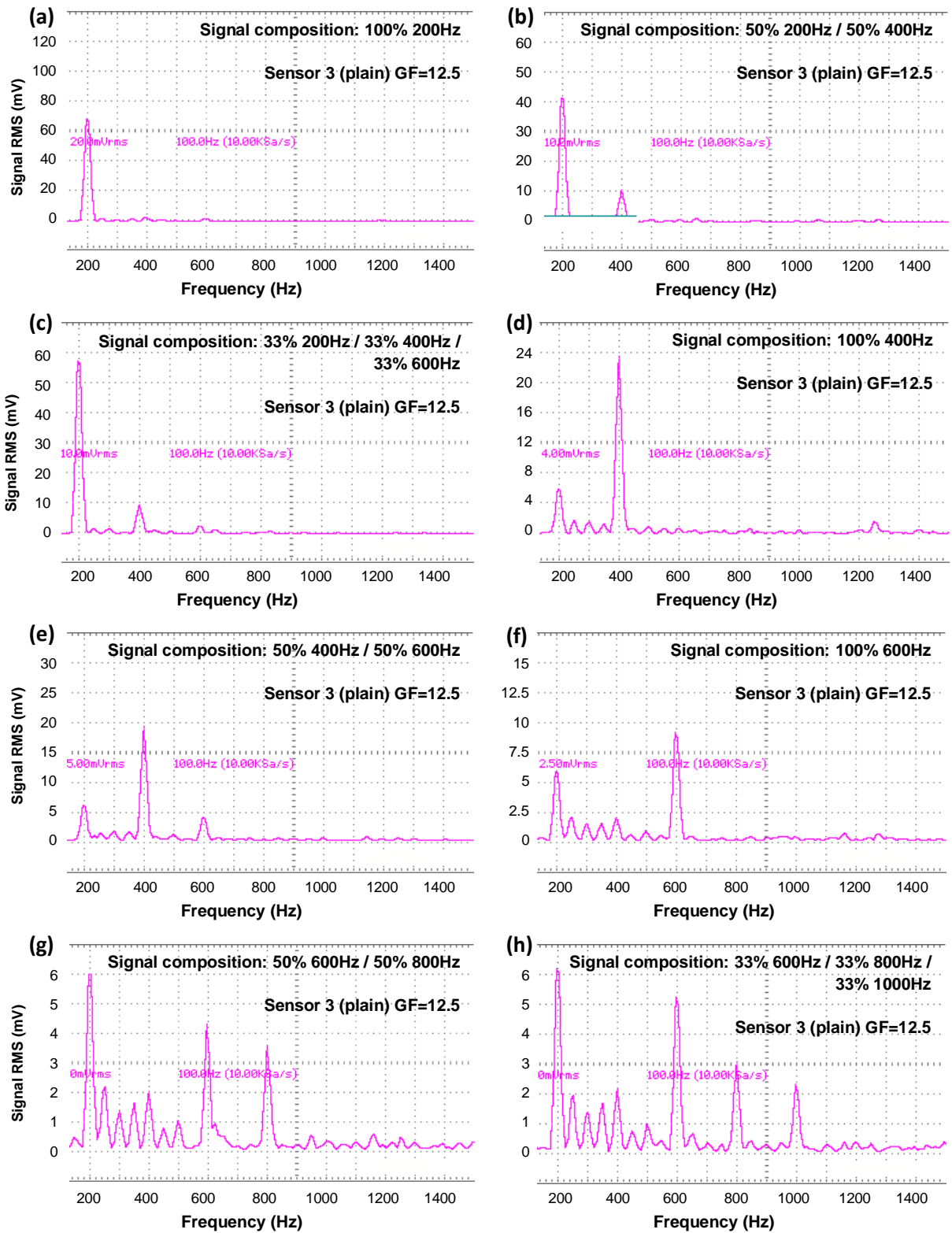
**Πίνακας 5:** Προσαρμοσμένες συναρτήσεις στα πειραματικά σημεία των αισθητήρων (Εικόνα 35)

Αισθητήρας	G factor	Προσαρμοσμένη συνάρτηση $g(x)$
3 («απλός»)	12.5	$g_3(x) = \frac{1.083 * 10^4}{x^2} + 0.058$
2a (αλουμίνια)	168	$g_{2a}(x) = \frac{9.775 * 10^3}{x^2}$
3a (αλουμίνια)	54	$g_{3a}(x) = \frac{4.496 * 10^4}{x^2}$

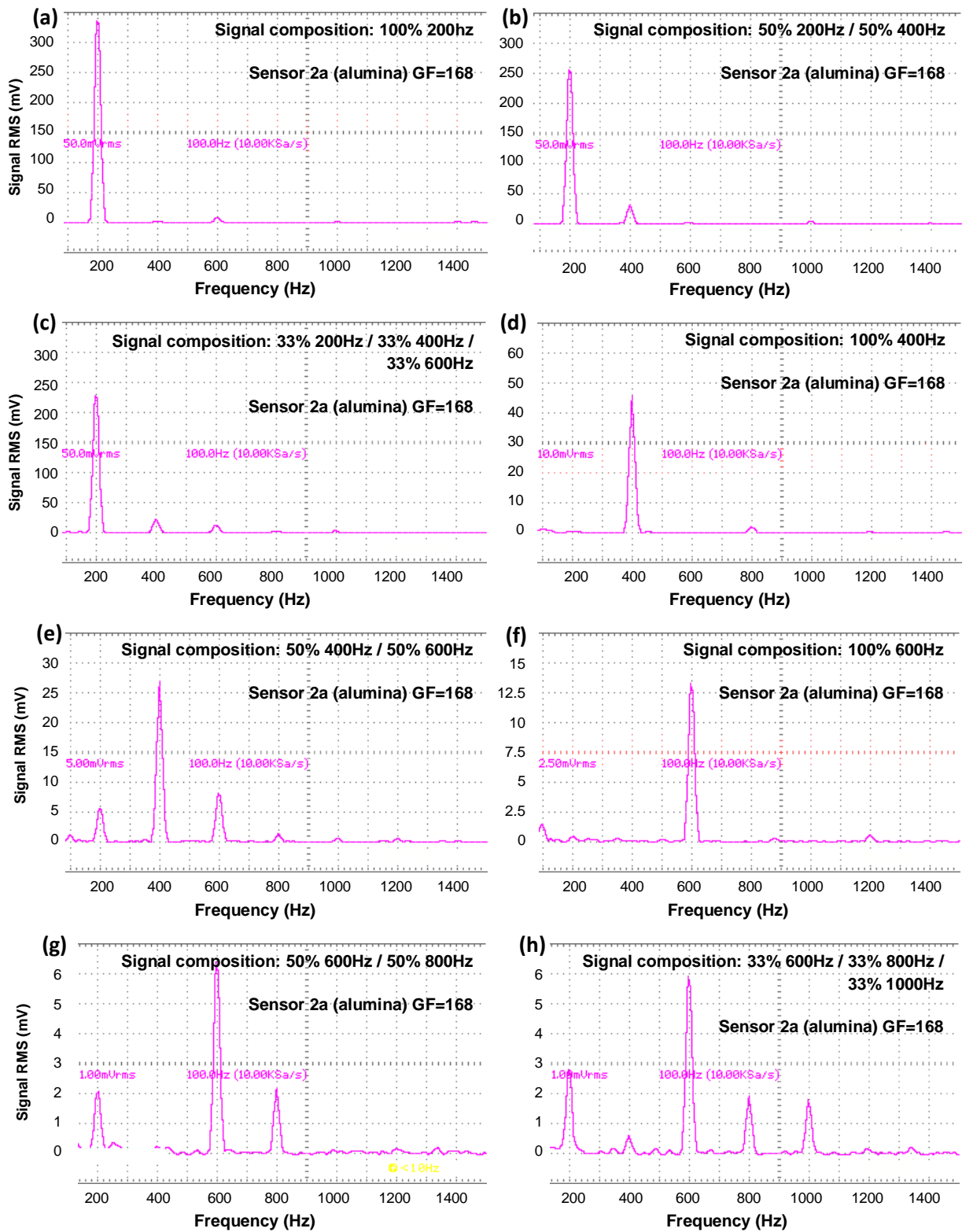
Ο αισθητήρας χωρίς αλουμίνα, S3, επέδειξε σαφέστερα μικρότερο μετρήσιμο εύρος συχνοτήτων, 25% λιγότερο από τους παρεμφερείς του. Η Εικόνα 35 δείχνει πολύ χαρακτηριστικά την επίδραση που έχει η αυξημένη ευαισθησία των αισθητήρων με αλουμίνα. Παρατηρεί κανείς ότι ο αισθητήρας 3 μπορεί να ανιχνεύσει μέχρι 3000Hz στα 16 Volt. Αντιθέτως, οι υπόλοιποι μπορούν να μετρήσουν στην ίδια τάση μέχρι 4000Hz και παρουσιάζουν πολύ μικρότερη παραμόρφωση. Δηλαδή με ανάλογους αισθητήρες (δηλαδή αισθητήρες νανοσωματιδίων όπου το υπόστρωμα τους θα έχει κατάλληλα φυσικά χαρακτηριστικά ώστε να εφαρμόζεται τέλεια στη μεμβράνη) με ίδιους μετρητικούς παράγοντες θα μπορούσαν να ανιχνευθούν αρκετά μεγαλύτερες τιμές συχνότητας.

### ***3.2.6γ Απόκριση αισθητήρων σε πολλαπλά σήματα***

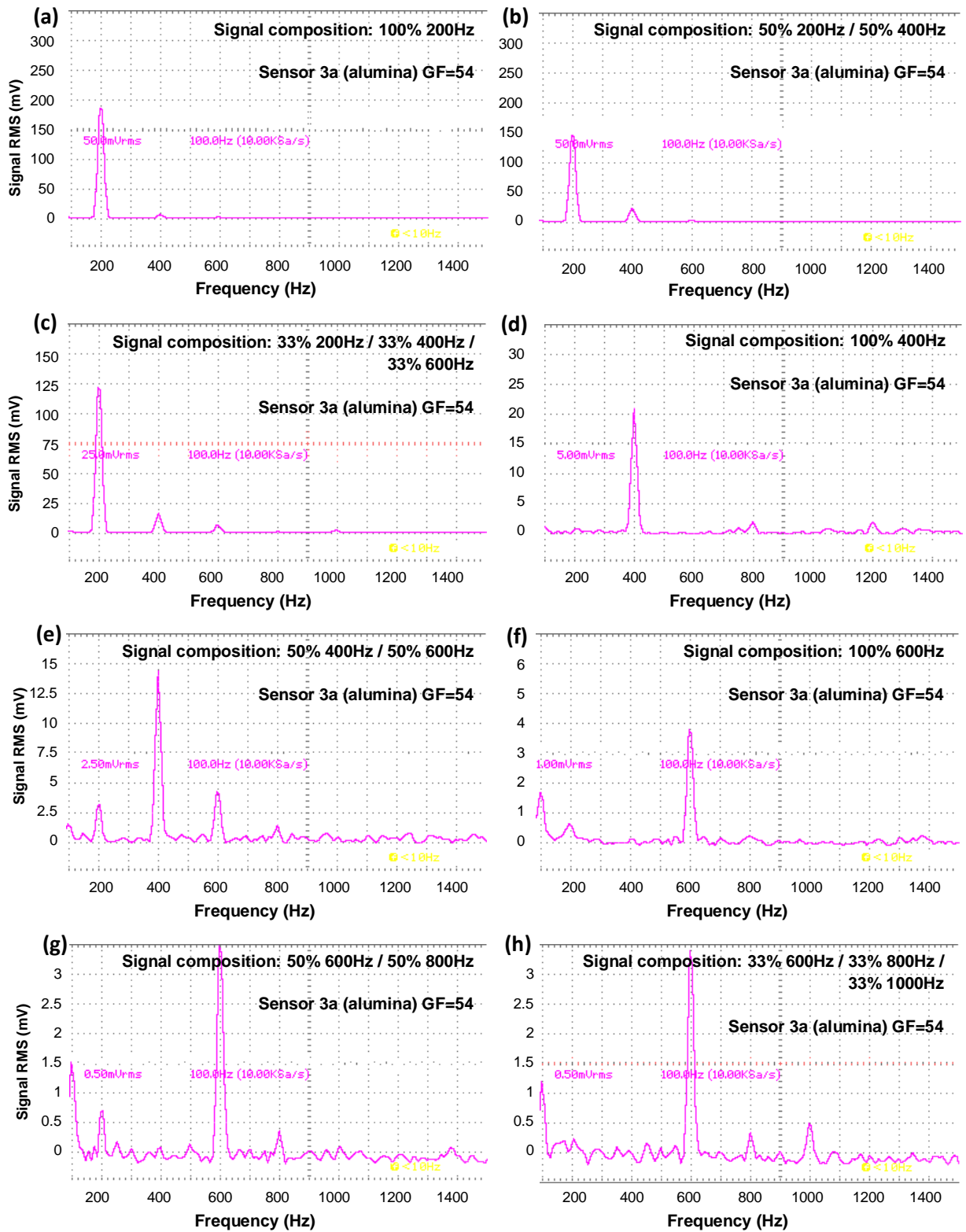
Για να αποκτηθεί μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα, εκτελέστηκαν δοκιμές που χρησιμοποιούσαν περισσότερες από μία διεγερτικές συχνότητες ταυτόχρονα. Ο σειρά που εφαρμόστηκαν ήταν η εξής: Πρώτα ενεργοποιήθηκε η θεμελιώδη συχνότητα H1 στα 200Hz. Στη συνέχεια, παράλληλα με αυτή, ενεργοποιήθηκε η πρώτη πολλαπλάσια συχνότητα H2 (400Hz). Έπειτα την δεύτερη H3 (600Hz). Στη συνέχεια διατηρήθηκε μόνο η H2, και θεωρήθηκε αυτή ως η θεμελιώδης πλέον κοκ. Η τάση ηρεμίας των αισθητήρων ήταν στα 16V. Τα αποτελέσματα των δοκιμών με πολλαπλές συχνότητες φαίνονται παρακάτω:



Εικόνα 36: (a)-(h) Συνδυασμός αρμονικών για τον αισθητήρα 3 ("απλός")



Εικόνα 37: (a)-(h) Συνδυασμός αρμονικών για τον αισθητήρα 2a (alumina)



Εικόνα 38: (a)-(h) Συνδυασμός αρμονικών για τον αισθητήρα 3a (alumina)

Τα διαγράμματα των Εικόνων 36-38 δείχνουν τον τρόπο που αποκρίνονται οι αισθητήρες στις συχνότητες που αναφέραμε. Η απόκριση είναι αρκετά ακριβής και στον «απλό» αισθητήρα 3 και σε αυτούς με την αλουμίνα. Το ίδιο μοτίβο ισχύει και σε αυτή την περίπτωση, τους αισθητήρες με αλουμίνα να αποδίδουν ισχυρότερο σήμα από τον αντίστοιχο «απλό».

Παρατηρείται όμως κάποιο σήμα σε κάποια διαγράμματα (πχ Εικόνα 37(g)/(h)) το οποίο δημιουργείται από τη συμβολή των κυμάτων που δημιουργούν οι διεγερτικές συχνότητες ή από αρμονικό θόρυβο λόγω ατελειών στην παροχή σήματος του ηχείου. Επίσης ο απλός αισθητήρας εμφανίζει μικρότερο λόγο σήματος με θόρυβο (SNR) ιδιαίτερα στις υψηλότερες συχνότητες.

### **3.2.6δ Παρακολούθηση αυξομείωσης ήχου**

Το τέταρτο υποπείραμα που διενεργήθηκε περιλάμβανε τη δημιουργία διακροτημάτων. Στόχος ήταν η διαπίστωση εάν ο αισθητήρας παρακολουθεί τις μεταβολές της παραμόρφωσης ακαριαία. Για να το επιτύχει αυτό θα πρέπει, πρώτον, να δημιουργούνται μορφές διακροτημάτων στην οθόνη και, δεύτερον, η συχνότητα αυτών να είναι ίση με την θεωρητικά προβλεπόμενη. Δημιουργήθηκαν δύο διακροτήματα, ένα με συχνότητα διακροτήματος τα 2Hz, και ένα με συχνότητα 10Hz. Ο μετασχηματισμός του Fourier δεν ήταν εφαρμόσιμος εδώ λόγω τεχνικής αδυναμίας, οπότε οι συχνότητες μετρήθηκαν με την κλίμακα που προσφέρεται από τον παλμογράφο στο χώρο του χρόνου. Μέσω της γνωστής σχέσης

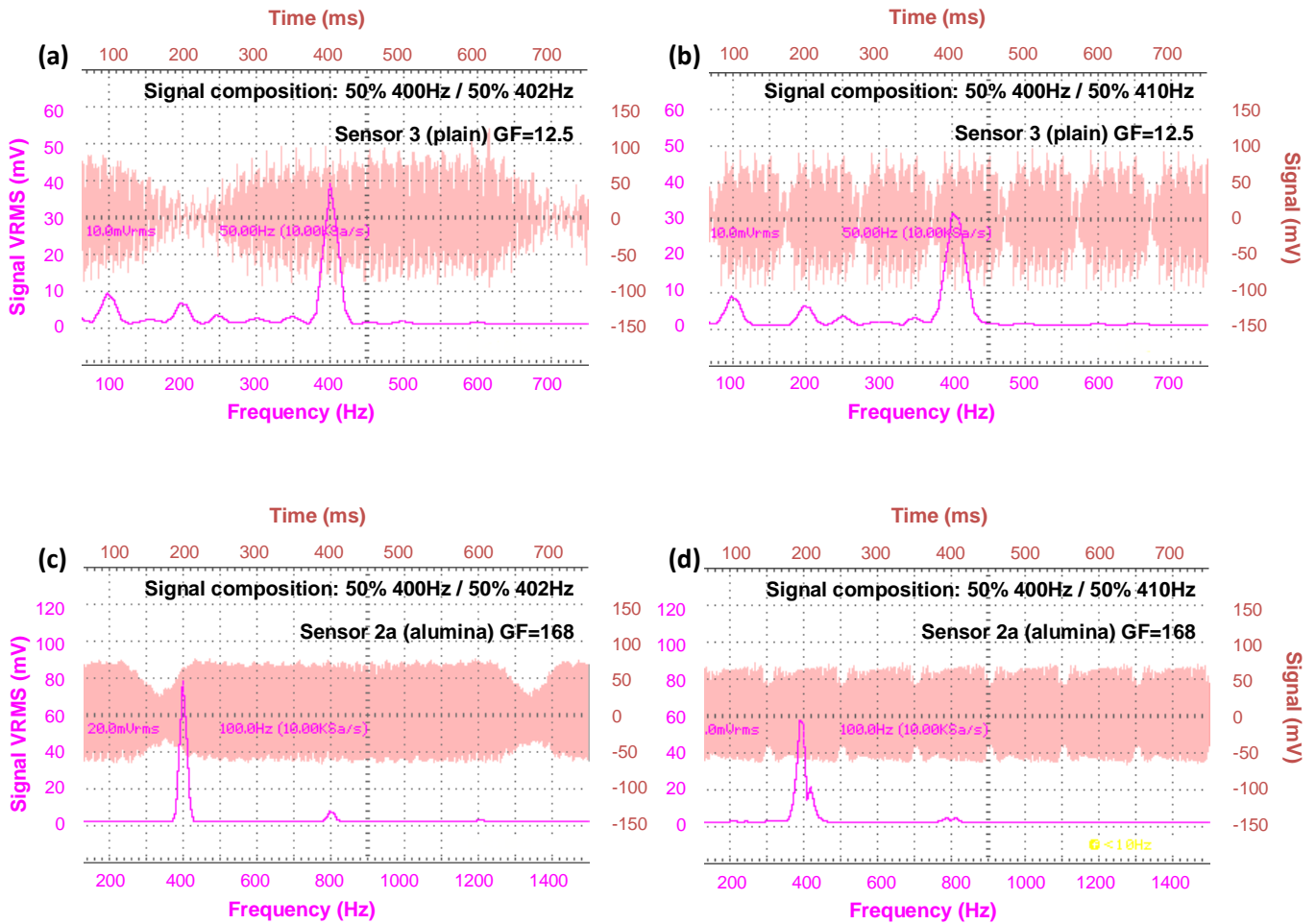
$$f = \frac{1}{T} \quad (29)$$

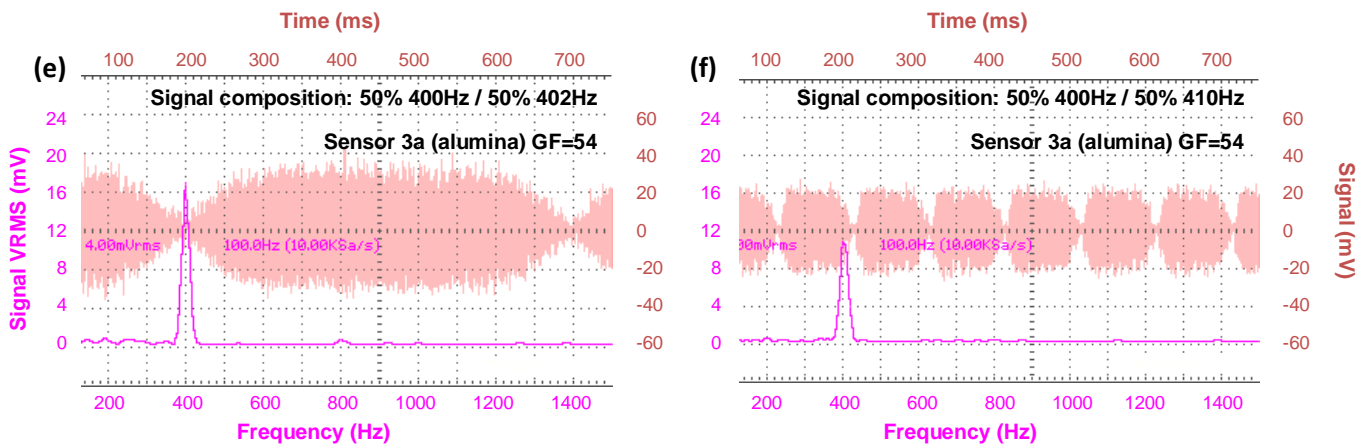
Όπου  $f$  η συχνότητα και  $T$  η περίοδος, υπολογίστηκε η πρώτη.



**Πίνακας 3:** Σύγκριση συχνοτήτων διακριτημάτων των αισθητήρων με τη θεωρητικά αναμενόμενη

Συνιστώσες συχνότητες (Hz)	Θεωρητική συχνότητα διακριτήματος (Hz)	Συχνότητα αισθητήρα 3 («απλός»)	Συχνότητα αισθητήρα 2a (αλουμίνα)	Συχνότητα αισθητήρα 3a (αλουμίνα)
400/402	2	2 +/- 0.08	2 +/- 0.08	2.00 +/- 0.04
400/410	10	10 +/- 0.2	10 +/- 0.2	10 +/- 0.2





**Εικόνα 39:** Κυματομορφές διακροτημάτων από τους αισθητήρες **(a), (c), (d):** Διακρότημα συχνότητας 2Hz, **(b), (d), (f):** Διακρότημα συχνότητας 10Hz. **Ροζ γράφημα:** Πεδίο χρόνου, **Ματζέντα γράφημα:** Πεδίο συχνοτήτων

Για όλα τα διαγράμματα παρατηρείται πως οι κυματομορφές είναι παρόμοιες με μικρές διαφορές (Εικόνα 39) Μόνο ο αισθητήρας 2a (Εικόνα 39(c)/(d)) φαίνεται πως δεν αντεπεξέρχεται εντελώς ικανοποιητικά στις μεταβολές της παραμόρφωσης όσο αφορά το πλάτος και όχι τη συχνότητα, αφού συγκρίνοντας τες με τις θεωρητικά αναμενόμενες όπου

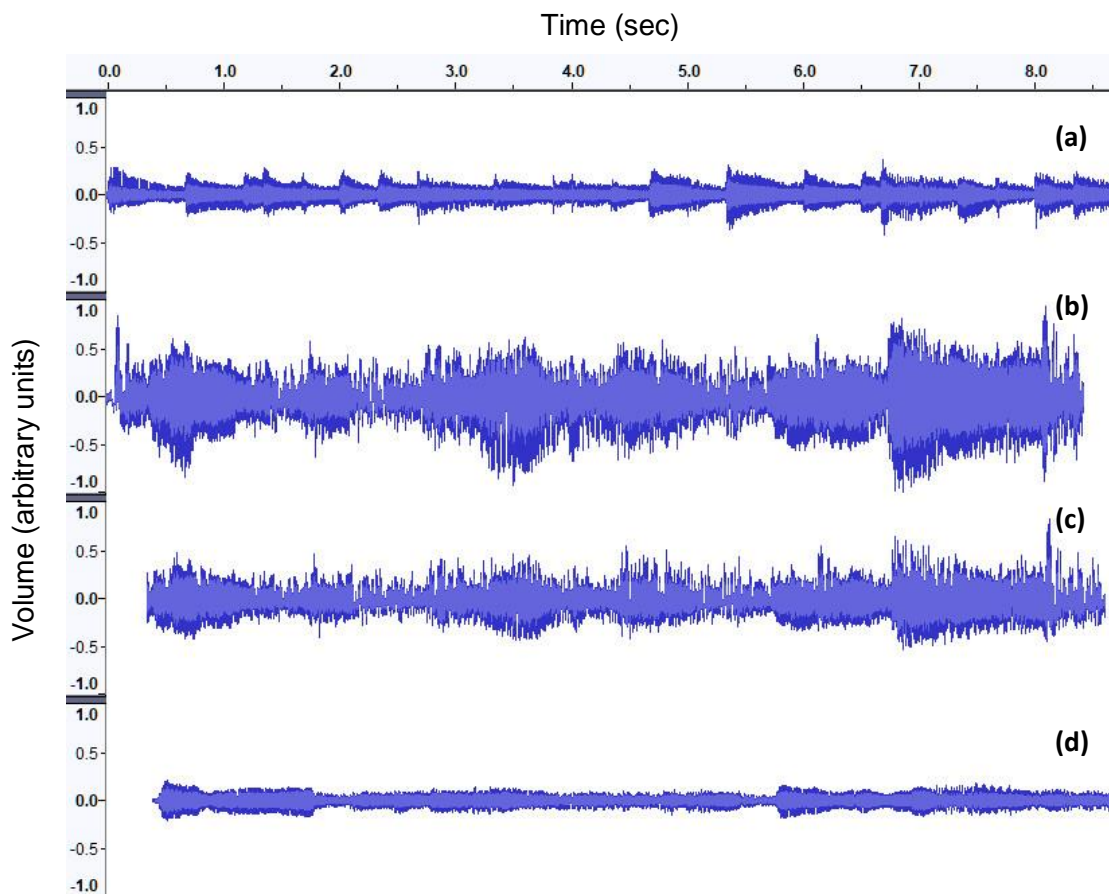
$$f_{theoretical} = f_1 - f_2 \quad (30)$$

συμπεραίνεται ότι οι ομοιότητες επεκτείνονται και στην σωστή παρακολούθηση της συχνότητας διακροτήματος. Ο Πίνακας 3 δείχνει τις συχνότητες που μετρήθηκαν.

### 3.2.6ε Καταγραφή μουσικού κομματιού

Το επόμενο υποπείραμα που εκτελέστηκε, περιελάμβανε την παρατήρηση της κυματομορφής που δημιουργεί ένα μουσικό κομμάτι. Το πρωτότυπο είναι μερικά δευτερόλεπτα από το τραγούδι Drunken Sailor. Η καταγραφή του σήματος έγινε με ρυθμό 5000Samples/sec. Αυτό μειώνει την ποιότητα του σήματος σε σχέση με τα 44100Samples/sec που ήταν καταγεγραμμένο το αρχικό κομμάτι. Λόγω του

χαμηλότερου Sample rate, η μέγιστη συχνότητα που μπορεί να μετρηθεί είναι τα 2500Hz με ακρίβεια, σύμφωνα με το θεώρημα δειγματοληψίας. Οι κυματομορφές παρουσιάζονται αυτούσιες χωρίς επιπρόσθετη επεξεργασία.



**Εικόνα 40:** Κυματομορφές των αισθητήρων στο τραγούδι Drunken Sailor **(a)**: Αρχικό σήμα **(b)**: Σήμα αισθητήρα 3a (alumina) GF=54 **(c)**: Σήμα αισθητήρα 2a (alumina) GF=168 **(d)**: Σήμα αισθητήρα 3 (plain) GF=12.5

Τα γραφήματα της Εικόνας 40(a)-(d) δείχνουν την απόκριση των αισθητήρων όταν η διέγερση περιγράφεται από το σήμα που αναγράφεται στην Εικόνα 40(a). Παρατηρείται μία αναπαραγωγή σήματος με πολύ μεγαλύτερη ένταση στους αισθητήρες 2a και 3a καθώς αυτοί έχουν το υψηλότερο G factor. Όταν αναπαραχθεί το σήμα πίσω στο ηχείο βγαίνει το συμπέρασμα ότι η υψηλότερη ένταση προέρχεται από τις χαμηλές συχνότητες. Παρατηρείται ότι ο ήχος ακούγεται πολύ βαθύς σε σύγκριση με το αρχικό κομμάτι. Αυτό είναι φυσιολογικό καθώς το ηχείο παρουσιάζει μεγαλύτερη εκτόπιση σε αυτό το εύρος συχνοτήτων. Αυτό το αποτέλεσμα βρίσκεται σε συμφωνία με τα

προηγούμενα αποτελέσματα που έδειξαν ότι το σήμα είναι ισχυρότερο στην χαμηλή περιοχή. Τέλος, από τα πλάτη των εντάσεων επαληθεύεται το συμπέρασμα πως οι αισθητήρες έχουν περιθώριο βελτίωσης της εφαρμογής τους με τη μεμβράνη. Αυτό δε προέρχεται από αναλυτική προσέγγιση, αλλά διαισθητική, καθώς το σήμα του 2a είναι λιγότερο έντονο από του 3a, παρά το γεγονός ότι έχει ~3 φορές μεγαλύτερη ευαισθησία. Παρακάτω προστίθεται ένας σύνδεσμος που περιέχει τις ηχογραφήσεις:

[https://drive.google.com/drive/folders/1KVE4PT\\_b5tEBjFMCa2h4P6WOutPMFzf0?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1KVE4PT_b5tEBjFMCa2h4P6WOutPMFzf0?usp=sharing)

## 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ –ΣΧΟΛΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ

### 4.1 Συμπεράσματα

Η διατριβή αυτή έδειξε πως αισθητήρες νανοσωματιδίων σε ελαστικά υποστρώματα μπορούν με αξιοπιστία να χρησιμοποιηθούν για να αναγνωρίσουν δονήσεις από 0Hz (στατική παραμόρφωση) έως και 4000Hz. Έτσι επιβεβαιώνονται τα αποτελέσματα των Yi et al., 2015 και Min et al. <sup>(27)-(29)</sup> που μπόρεσαν να μετρήσουν δονήσεις με αισθητήρες νανοσωματιδίων, αν και κατασκευασμένους από διαφορετικά νανοσωματίδια και υπόστρωμα σε σχέση με αυτούς που παρουσιάστηκαν. Ο κάθε αισθητήρας συνδεόταν σε σειρά με την πηγή σταθερού ρεύματος, η οποία λειτουργούσε ως η τροφοδοσία (Ενότητα 3.2.5, Εικόνα 28). Έτσι, βγήκε το συμπέρασμα ότι η εξάρτηση του σήματος που μετράται από τον παλμογράφο είχε άμεση σχέση με την τάση ηρεμίας του αισθητήρα, όπου η τάση ηρεμίας ήταν η διαφορά τάσης που αναπτυσσόταν στα άκρα του αισθητήρα όταν αυτός ήταν ακίνητος. Όσο ελαττωνόταν η τάση ηρεμίας, ελαττωνόταν το σήμα, με κίνδυνο να μη διακρίνεται από τον θόρυβο.

Η φύση του ηχείου, το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως ταλαντωτής, ήταν τέτοια, ώστε στις χαμηλότερες συχνότητες η μετακίνηση της μεμβράνης του ήταν μεγαλύτερη. Αυτή η παρατήρηση αντικατοπτρίστηκε και στα αποτελέσματα, καθώς η ένταση του σήματος μειώθηκε δραματικά με την αύξηση της συχνότητας. Επιπρόσθετα, στα σήματα που λήφθηκαν παρατηρήθηκε, σε ορισμένες περιπτώσεις, κάποια αρμονική παραμόρφωση χαμηλής έντασης. Αυτό είναι απόρροια της μη καθαρής συχνότητας ταλάντωσης του ηχείου λόγω δευτερογενών κυμάτων ή και ατελούς τροφοδοσίας του από τον υπολογιστή. Μετρήσεις με πολλαπλές ταυτόχρονες συχνότητες απέδωσαν ενθαρρυντικά αποτελέσματα καθώς συνδυασμοί αρμονικών συχνοτήτων στο φάσμα λειτουργίας έδειξαν να αναγνωρίζονται χωρίς δυσκολία από τους αισθητήρες.

Η αναγνώριση μουσικής ήταν ένα ακόμα επιτυχές πείραμα. Σε αυτή την περίπτωση όλοι οι αισθητήρες που δοκιμάστηκαν αναγνώρισαν το μουσικό κομμάτι που αναπαράχθηκε από το ηχείο, παρά τις μεγάλες διαφορές στις ευαισθησίες τους και τη διαφορετική

φύση τους (με αλουμίνα ή χωρίς). Η συμπεριφορά του ηχείου το οποίο προκαλεί μεγάλες παραμορφώσεις στις χαμηλότερες συχνότητες ήταν άμεσα εμφανής και σε αυτό το πείραμα, καθώς η αναπαραγωγή του καταγεγραμμένου σήματος είχε πολύ μεγάλη ένταση στις χαμηλές συχνότητες. Αυτή η συμπεριφορά παρατηρήθηκε σε όλους τους αισθητήρες.

Οι αισθητήρες με επίστρωση αλουμίνας εμφάνισαν πολύ μεγαλύτερη ευαισθησία. Οι ρωγμές που δημιουργήθηκαν στην αλουμίνα, έπειτα από μηχανική καταπόνηση, επέτρεψαν την ανάπτυξη αρκετά υψηλότερων συντελεστών ευαισθησίας, γεγονός που επιβεβαιώθηκε μέσω του στατικού χαρακτηρισμού αλλά και από τα σήματα που καταγράφηκαν στις δυναμικές μελέτες. Η υψηλή ευαισθησία των αισθητήρων τους κατέστησε ικανούς να αναγνωρίσουν ταλαντώσεις με παραμόρφωση κάτω από  $\varepsilon = 10^{-4}\%$  το οποίο στην περίπτωση διεγείροντος σήματος 100Hz ήταν μη αντιληπτό από το ανθρώπινο αυτί.

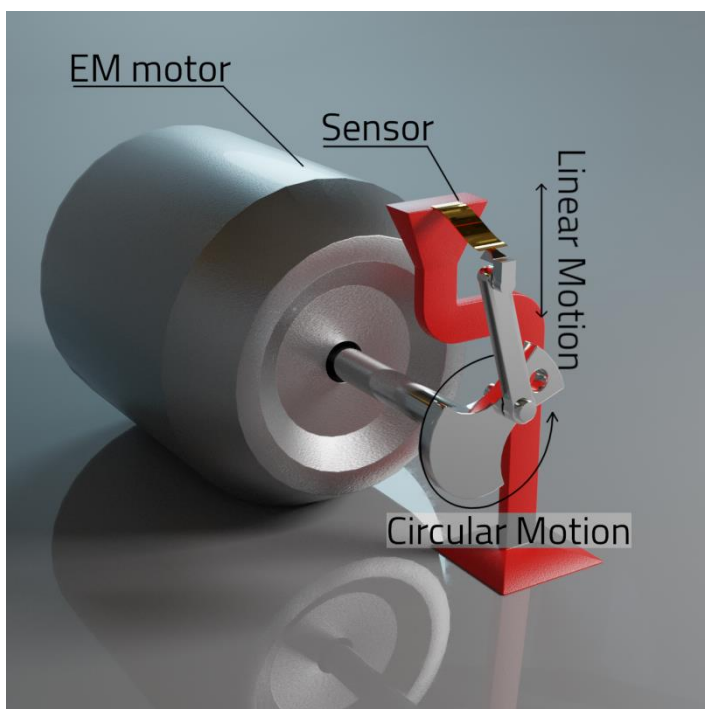
Σε κάθε επίπεδο οι αισθητήρες με επίστρωση αλουμίνας επέδειξαν καλύτερες επιδόσεις, είτε αυτό είναι η ευαισθησία τους ή η σταθερότητα του σήματος. Αυτό τους κάνει την προτιμητέα λύση σχεδόν σε κάθε περίπτωση. Ο μόνος λόγος επιλογής των απλών αισθητήρων είναι το γεγονός ότι η μικρότερη εν γένει ευαισθησία τους προσεγγίζεται καλύτερα από μια γραμμική σχέση της αντίστασης από την παραμόρφωση.

## 4.2 Σχόλια για το μέλλον

Αναλύοντας τα αποτελέσματα μπορούν να βρεθούν αρκετοί τρόποι βελτίωσης του συστήματος, ώστε να παρέχει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα σε μεγαλύτερο φάσμα συχνοτήτων. Ο πρώτος τρόπος, ο οποίος αναφέρθηκε ήδη στην ενότητα 5.2.6α, προτείνει να αυξηθεί η απόδοση των αισθητήρων πάνω στο υπό ταλάντωση σύστημα. Ο τρόπος με τον οποίο θα εφαρμοστεί, θα πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να παρέχει μία σημαντική αρχική παραμόρφωση στον αισθητήρα, καθώς είναι γνωστό ότι η ευαισθησία είναι μεγαλύτερη στις μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Χρειάζεται προσοχή σε αυτό το σημείο αφού το πολύϊμίδιο αναπτύσσει εσωτερική τάση κατά την

παραμόρφωση του και είναι δυνατόν να αποκολληθεί χωρίς εξωτερικό ερέθισμα. Για αυτό το λόγο οι φυσικές διαστάσεις του αισθητήρα, δηλαδή το μήκος των ηλεκτροδίων του και η τοποθέτηση του διάκενου νανοσωματιδίων, πρέπει να μπορούν να επικαλύπτουν το χείλος του ηχείου (Ενότητα 3.2.5, Εικόνα 27). Ακόμα, η συνδετική κόλλα πρέπει να είναι από υλικό που θα αντέχει έντονες παραμορφώσεις και υψηλές συχνότητες χωρίς να ξεκολλάει. Επιπλέον, για να αποφευχθεί η αποκόλληση, θα πρέπει να δοθεί σημασία ώστε να μην υπάρξουν φυσικά κενά, ή άλλης φύσεως απροσεξίες μεταξύ των υλικών.

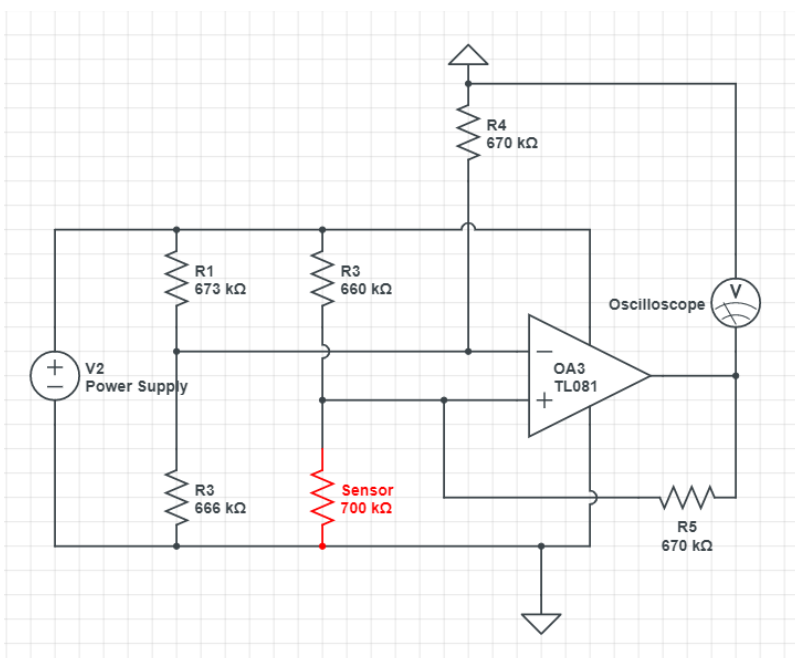
Η προηγούμενη πρόταση δέχεται ως δεδομένη τη χρήση ηχείου ως ταλαντωτή. Αυτό έχει τα πλεονεκτήματα που έχουν ήδη αναφερθεί, παρόλα αυτά έχει ένα σοβαρό μειονέκτημα. Η παραμόρφωση δεν είναι σταθερή για κάθε συχνότητα. Έτσι, προτείνεται να κατασκευαστεί ένας μηχανισμός που θα μπορεί να παρέχει σταθερή κάμψη σε όλο το φάσμα συχνοτήτων. Παράδειγμα αποτελεί ένας αντίστροφος μηχανισμός κινητήρα αυτοκινήτου. Δηλαδή, αν αντί να αξιοποιηθεί η γραμμική κίνηση του πιστονιού για να



**Εικόνα 41:** Προτεινόμενη διάταξη για ίδια παραμόρφωση σε εύρος συχνοτήτων

μετατραπεί σε περιστροφική στον στρόφαλο, θα γίνει το ανάποδο. Συνεπώς, μπορεί να προσαρμοστεί ένας ηλεκτρομαγνητικός κινητήρας σε ένα στρόφαλο και να εκτελεστεί η αντίθετη διαδικασία. Στην άκρη του πιστονιού, αυτή τη φορά, θα προσαρμοστεί η μία άκρη του αισθητήρα και η δεύτερη σε ένα ακλόνητο σημείο (Εικόνα 41). Οι διαστάσεις των εξαρτημάτων προσαρμόζονται για να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή παραμόρφωσης. Επιπλέον βελτιώσεις σε ένα τέτοιο σύστημα περιλαμβάνουν την χρήση προεπιλεγμένων υποδοχών

της μπιέλας του πιστονιού για διαφορετικές παραμορφώσεις στον αισθητήρα. Επειδή οι δυνάμεις που θα αναπτύσσονται σε ένα τέτοιο σύστημα θα είναι αρκετά μεγάλες, ειδικά στις υψηλές συχνότητες, η κατασκευή προτείνεται να αποτελείται από αλουμίνιο, το οποίο είναι ελαφρύ μέταλλο, και όχι παραμαγνητικό, ώστε να μην επηρεάζεται η λειτουργία του ηλεκτρομαγνήτη.



**Εικόνα 42:** Κύκλωμα αισθητήρα με γέφυρα Wheatstone

τον τρόπο μεταβολές στην αντίσταση του αισθητήρα προκαλούν αστάθεια στη γέφυρα. Η τάση που παράγεται μπορεί έπειτα να ενισχυθεί και να κατευθυνθεί προς τον παλμογράφο (Εικόνα 42).

Για την βελτίωση της απόδοσης του αισθητήρα γίνεται να πειραματιστεί κανείς με την πυκνότητα και μέγεθος των νανοσωματιδίων, καθώς και το είδος τους. Είναι γνωστό πως τέτοιες παράμετροι καθορίζουν έντονα τον μετρητικό παράγοντα. Τέλος, θα μπορούσαν να γίνουν δοκιμές εναπόθεσης σε διαφορετικό υπόστρωμα, όπως το PDMS, που είναι και εκτατό εκτός από εύκαμπτο.

Τρίτος τρόπος βελτίωσης του συστήματος περιλαμβάνει δραστική μετατροπή ολόκληρου του κυκλώματος. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε ένα σειριακό κύκλωμα με σταθερή πηγή ρεύματος. Αυτό μπορεί να αντικατασταθεί από μία γέφυρα Wheatstone και η παροχή ενέργειας από πηγή σταθερής τάσης. Με αυτό



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### Αναπαραγωγή Δεδομένων Αρχείου .csv με το πρόγραμμα Audacity

Ανοίγεται το αρχείο όπου έχουν καταγραφεί οι μετρήσεις του παλμογράφου. Δίνεται προσοχή ώστε ο τύπος που έχουν καταγραφεί τα δεδομένα να είναι .csv. Η μορφή του θα πρέπει να είναι όπως η επόμενη (Εικόνα Π1) (χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Excel για την ανάγνωση του αρχείου).

Record Length	45000	Source	CH4
Sample In	CH4:0.000040000000	Second	Volt
Vertical U	CH4:V	-4.5	-0.072
Vertical S	CH4:0.20	-4.4998	-0.08
Vertical O	CH4:0.00	-4.4996	-0.08
Horizontal s		-4.4994	-0.072
Horizontal	0.5	-4.4992	-0.072
Model Nu	WaveAce2034	-4.499	-0.08
Serial Nur	LCRY2251C01314	-4.4988	-0.072
Software	' 5.03.02.32	-4.4986	-0.08
		-4.4984	-0.072
		-4.4982	-0.064
		-4.498	-0.08
		-4.4978	-0.096
		-4.4976	-0.096
		-4.4974	-0.104
		-4.4972	-0.12
		-4.497	-0.128
		-4.4968	-0.136
		-4.4966	-0.136
		-4.4964	-0.128
		-4.4962	-0.128
		-4.496	-0.136
		-4.4958	-0.136
		-4.4956	-0.136

**Εικόνα Π1:** Παράθυρο του Excel με το ανοιγμένο αρχείο .csv. Το κόκκινο περίγραμμα τονίζει την στήλη που χρειάζεται να αντιγραφεί.

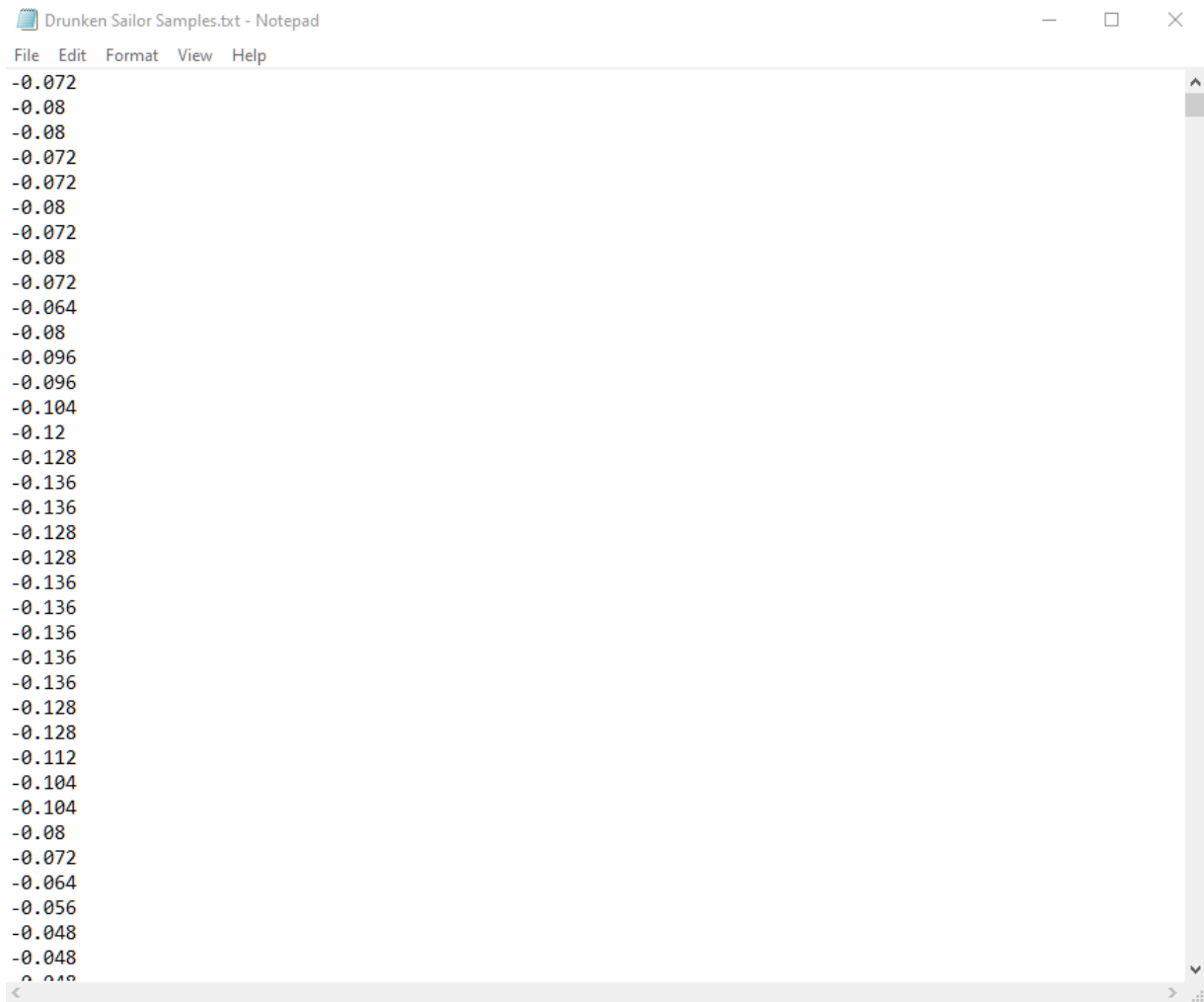
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
44978				4.495	-1.024								
44979				4.4952	-1.024								
44980				4.4954	-1.024								
44981				4.4956	-1.024								
44982				4.4958	-1.024								
44983				4.496	-1.024								
44984				4.4962	-1.024								
44985				4.4964	-1.024								
44986				4.4966	-1.024								
44987				4.4968	-1.024								
44988				4.497	-1.024								
44989				4.4972	-1.024								
44990				4.4974	-1.024								
44991				4.4976	-1.024								
44992				4.4978	-1.024								
44993				4.498	-1.024								
44994				4.4982	-1.024								
44995				4.4984	-1.024								
44996				4.4986	-1.024								
44997				4.4988	-1.024								
44998				4.499	-1.024								
44999				4.4992	-1.024								
45000				4.4994	-1.024								
45001				4.4996	-1.024								
45002				4.4998	-1.024								

**Εικόνα Π2:** Περιοχή σταθερών τιμών στο τέλος του αρχείου. Πρέπει να διαγραφούν

Τα δεδομένα πρέπει να ελεγχθούν ώστε να μην περιέχουν τιμές με απόλυτη τιμή μεγαλύτερη του ένα. Αν παρατηρηθούν τέτοιες τιμές, βρίσκεται η μεγαλύτερη και έπειτα κανονικοποιούνται όλες οι τιμές σε αυτήν. Επίσης αν βρεθεί περιοχή δεδομένων με την ίδια τιμή στο τέλος πρέπει να διαγραφεί (Εικόνα Π2).

Μετά από αυτές τις μορφοποιήσεις, επιλέγουμε και αντιγράφουμε τη δεύτερη στήλη μόνο όπου καταγράφονται τα Volt (Εικόνα Π1).

Έπειτα δημιουργούμε ένα αρχείο **.txt** (προσοχή στον τύπο αρχείου, μόνο **.txt** αναγνωρίζεται από το Audacity). Σε αυτό επικολλάται την στήλη που αντιγράφηκε προηγουμένως. Οι βοηθητικές λέξεις στην αρχή της στήλης δε χρειάζονται και διαγράφονται. Το αρχείο, τέλος, αποθηκεύεται. Η μορφή του αρχείου **.txt** φαίνεται στην Εικόνα Π3

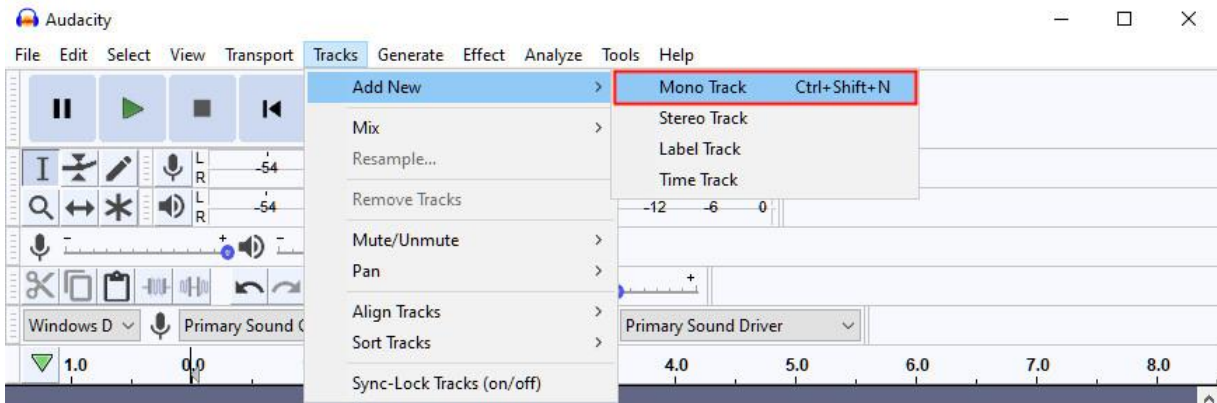


**Εικόνα Π3:** Μορφή του αρχείου **.txt**

Η ίδια ακριβώς διαδικασία πρέπει να επαναληφθεί και για μηδενικό σήμα. Με αυτό τον τρόπο καταγράφεται το σήμα θορύβου και θα χρησιμοποιηθεί έπειτα για να παραχθεί το πραγματικό σήμα.

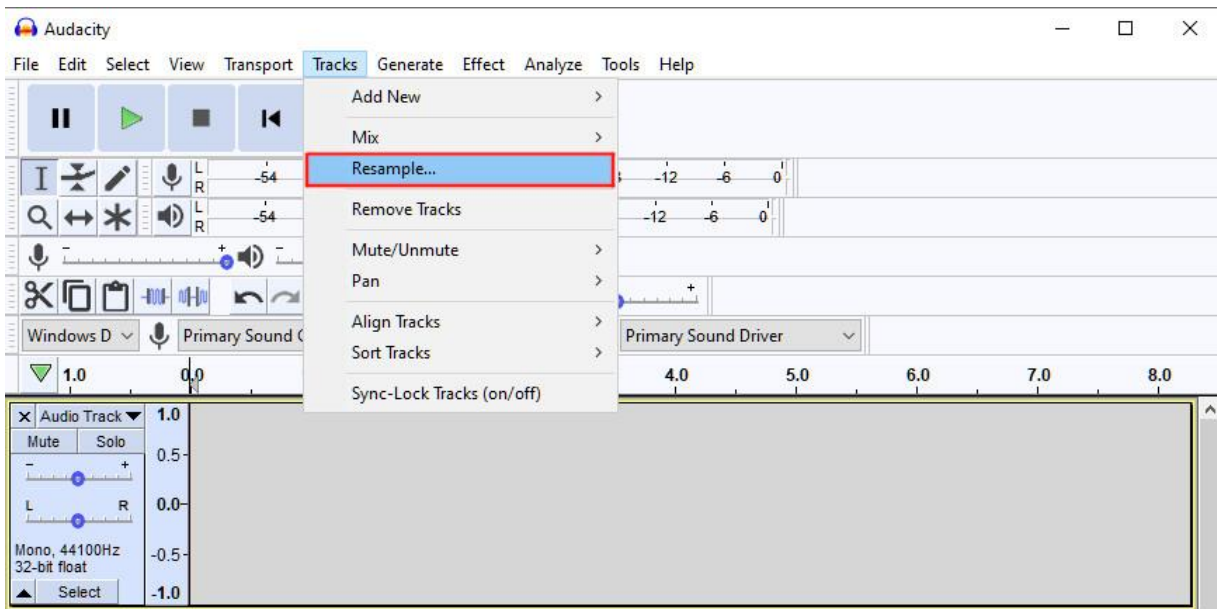
Τελικά θα πρέπει να υπάρχουν δύο αρχεία **.txt**. Το ένα αντιπροσωπεύει το πραγματικό σήμα και το δεύτερο το σήμα θορύβου.

Έπειτα ανοίγουμε το πρόγραμμα Audacity 3.0.4. Γίνεται κλικ στην επιλογή “Tracks → Add New → Mono Track” (Εικόνα Π4)



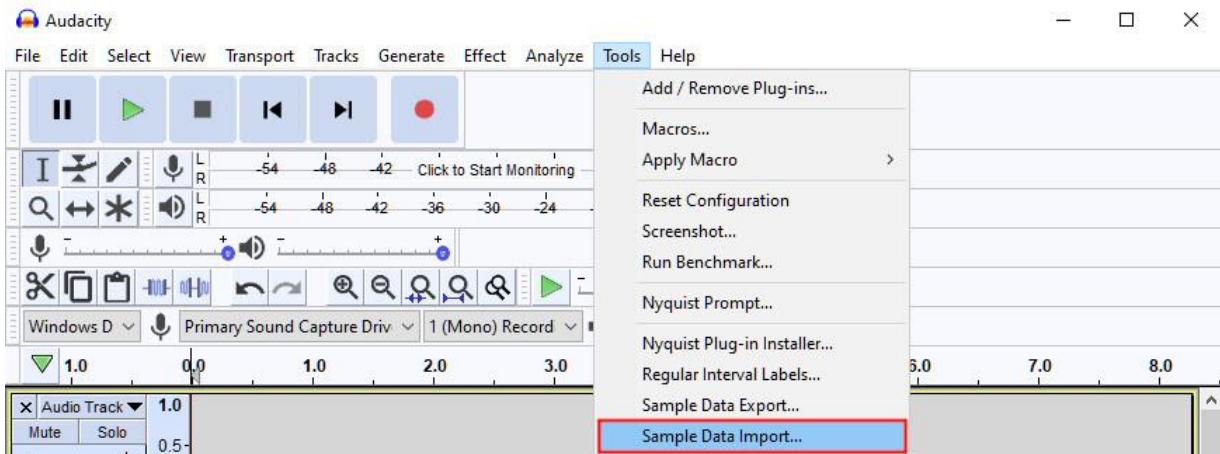
**Εικόνα Π4:** Εισαγωγή Κενού κομματιού

Στο επόμενο βήμα, γίνεται κλικ στο “Tracks → Resample” έχοντας επιλεγμένο το κομμάτι δημιουργήθηκε στο προηγούμενο βήμα (Εικόνα Π5). Η τιμή που εισάγεται πρέπει να είναι αυτή με την οποία ο παλμογράφος κατέγραψε τα δεδομένα. Σε αυτή την περίπτωση ήταν 5000Samples/sec (Εισάγεται η τιμή 5000 στο πλαίσιο).



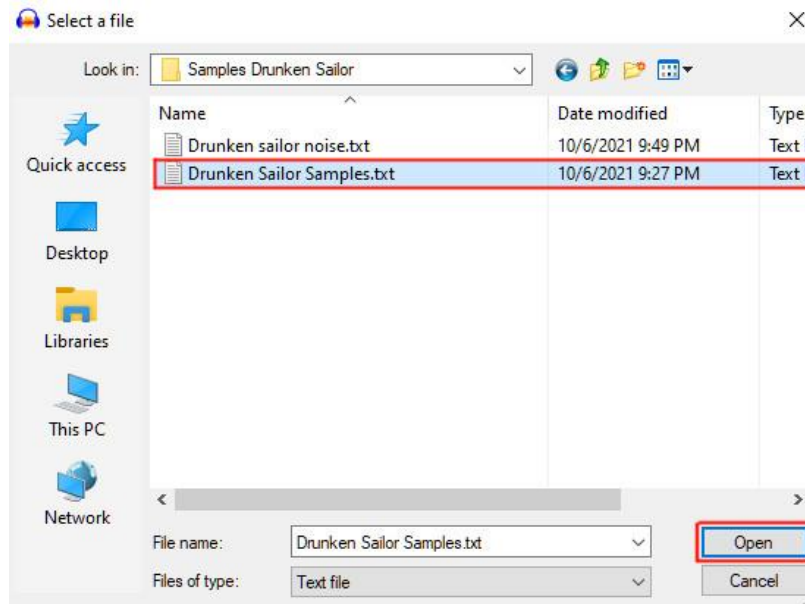
**Εικόνα Π5:** Αλλαγή των Samples ώστε να ταυτίζεται με αυτά που κατέγραφε ο παλμογράφος. Το κομμάτι που δημιουργήθηκε όταν είναι επιλεγμένο έχει ένα κίτρινο περίγραμμα.

Τώρα θα εισαχθούν τα δεδομένα. Έχοντας πάλι επιλεγμένο το κομμάτι γίνεται κλικ στο “Tools → Sample Data Import...” (Εικόνα Π6).



**Εικόνα Π6:** Εισαγωγή δεδομένων από .txt αρχείο

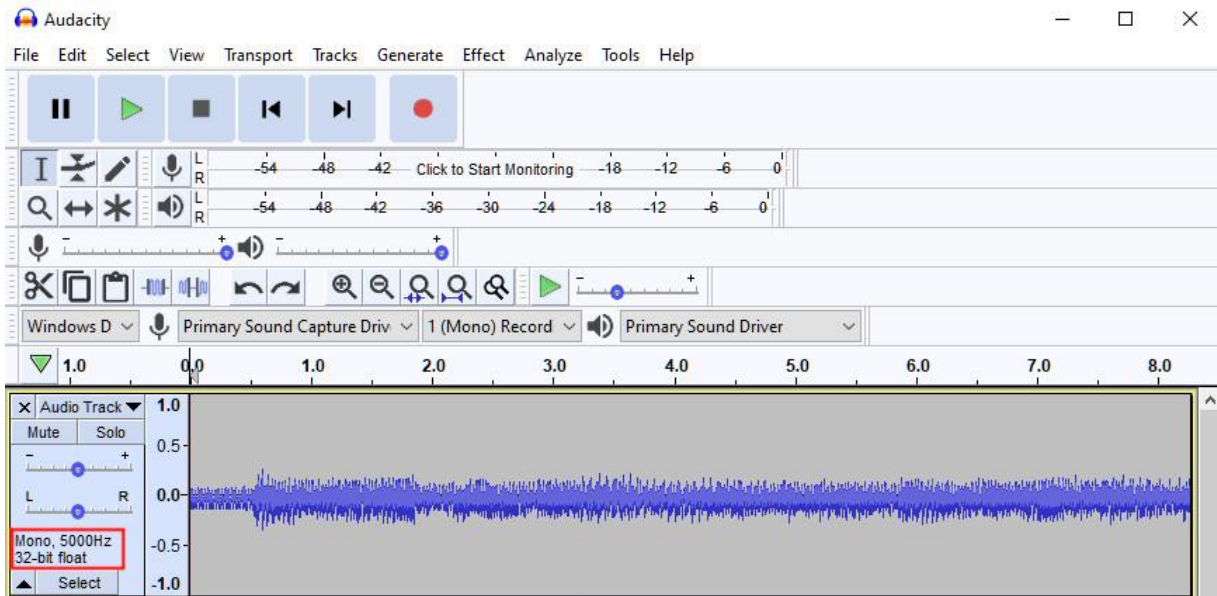
Στο πεδίο που εμφανίζεται επιλέγεται το “Select a file” και ένα δεύτερο πλαίσιο θα εμφανιστεί. Επιλέγεται το αρχείο .txt που έχει προετοιμαστεί και γίνεται κλικ στο “Open” (Εικόνα Π7). Γίνεται επιβεβαίωση με το “Ok” στο πρώτο παράθυρο.



**Εικόνα Π7:** Άνοιγμα του αρχείου με τα δεδομένα

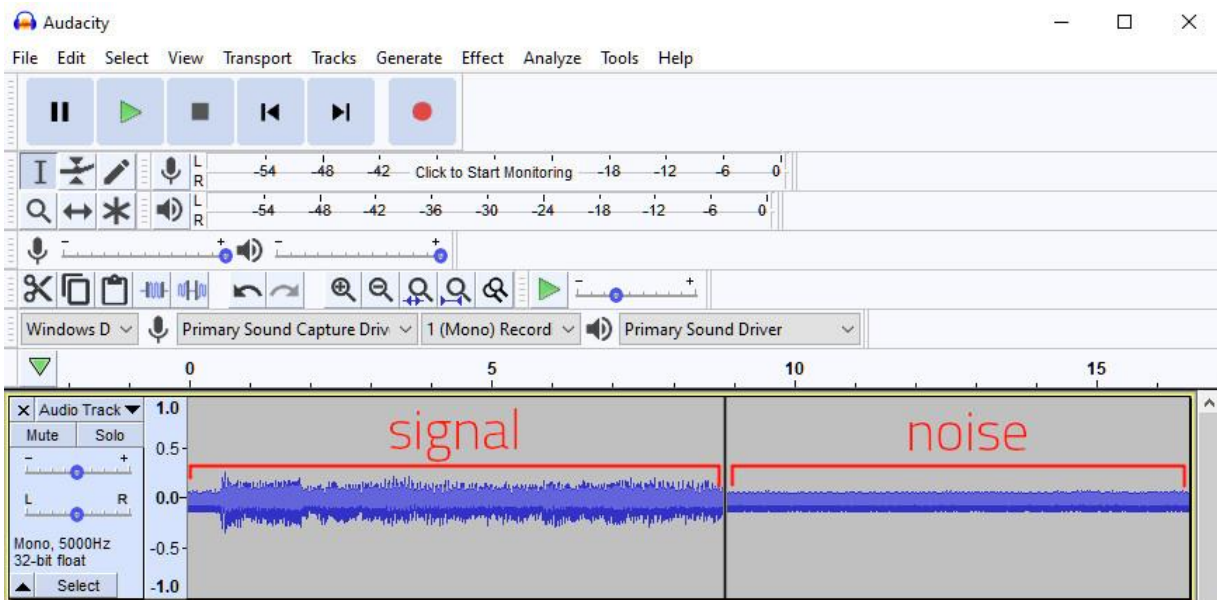


Η κυματομορφή θα πρέπει να μοιάζει κάπως έτσι (Εικόνα Π8):



**Εικόνα Π8:** Η κυματομορφή έπειτα από την εισαγωγή της. Η αλλαγή των Samples φαίνεται στο κόκκινο πλαίσιο.

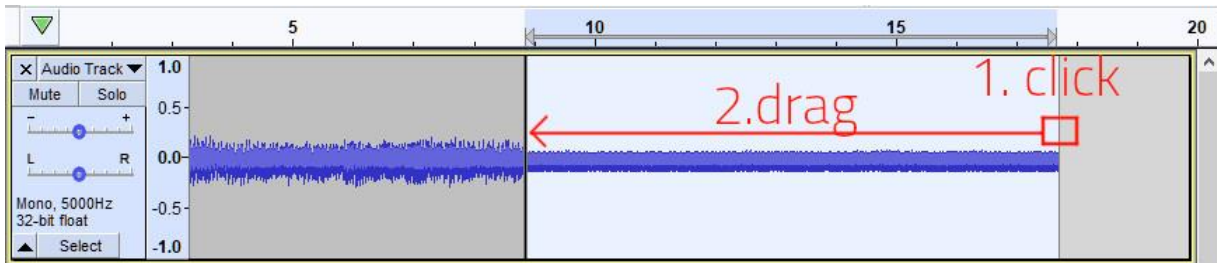
Ο κέρσορας, έπειτα, τοποθετείται στο τέλος της κυματομορφής που εισάχθηκε. Η ίδια διαδικασία με πριν επαναλαμβάνεται, μόνο που αυτή τη φορά το αρχείο που θα εισαχθεί είναι αυτό με τα δεδομένα θορύβου. Όταν αυτό το βήμα ολοκληρωθεί, η κυματομορφή συνολικά θα έχει την επόμενη μορφή (Εικόνα Π9): Χρήσιμη είναι η αναπαραγωγή για



**Εικόνα Π9:** Συνολικό σήμα μαζί με επίπεδο θορύβου

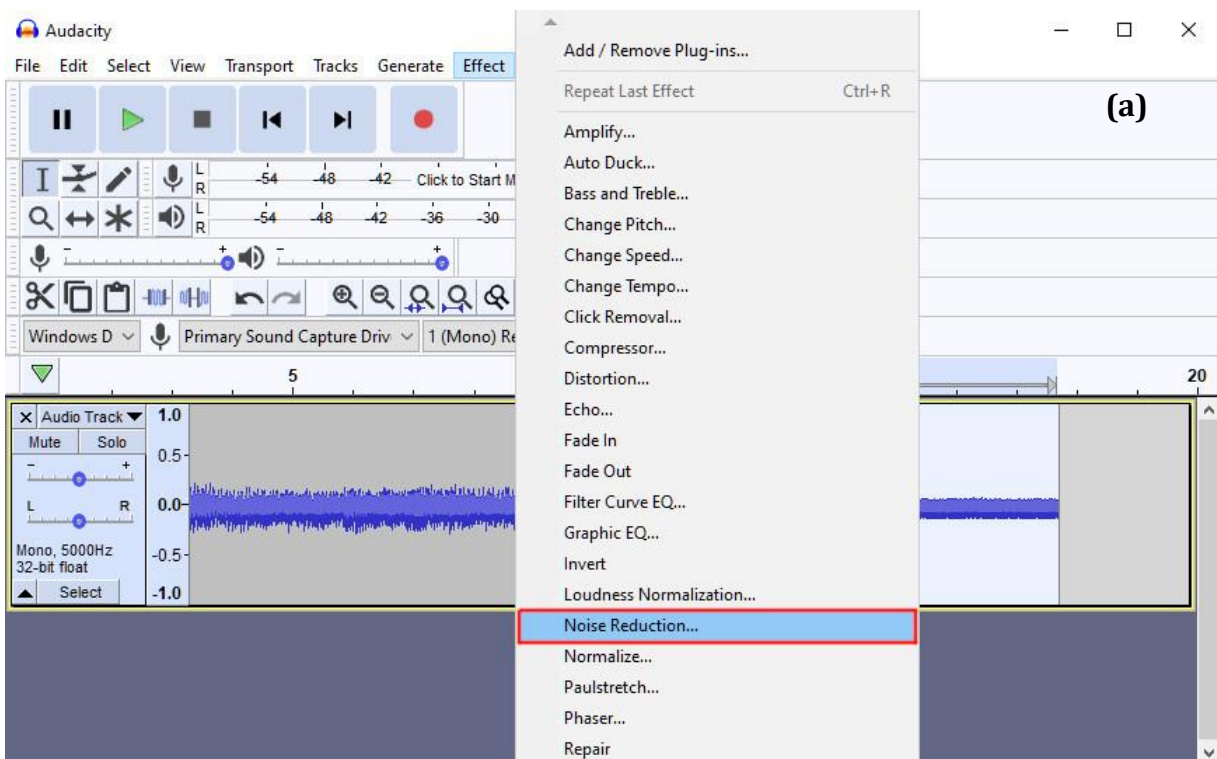
την επιβεβαίωση ότι η κυματομορφή αναπαριστά το αρχικό σήμα σε κάποιο βαθμό.

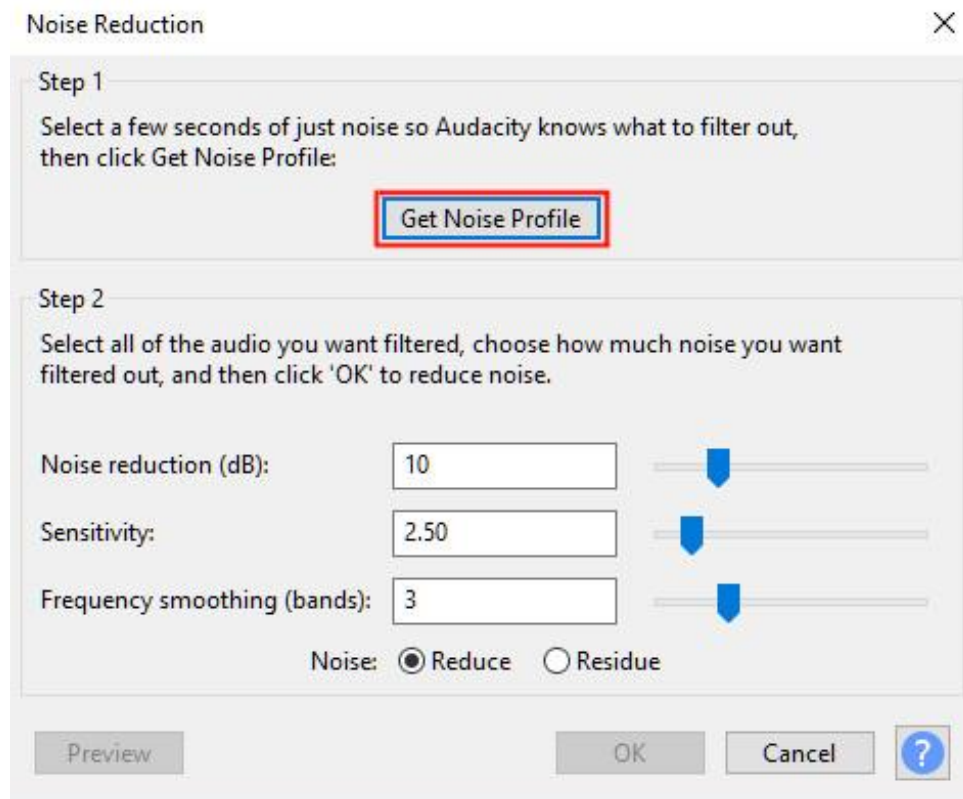
Στο επόμενο βήμα επιλέγεται μόνο ο θόρυβος (Εικόνα Π10).



**Εικόνα Π10:** Επιλογή του σήματος θορύβου

Έχοντας επιλεγμένο το θόρυβο, γίνεται κλικ στο “Effect → Noise Reduction...” (Εικόνα Π11(a)). Στο πλαίσιο που εμφανίζεται επιλέγεται το “Get Noise Profile” (Εικόνα Π11(b)).





(b)

**Εικόνα Π11:** Απόκτηση προφίλ θορύβου (a): Επιλογή της μείωσης θορύβου (b): Επιβεβαίωση προφίλ θορύβου

Τελευταίο βήμα είναι να επιλεγθεί ολόκληρη η κυματομορφή. Ξανά γίνεται κλικ στην επιλογή “Noise Reduction...”. Οι τιμές των παραμέτρων ρυθμίζονται ανάλογα με την περίσταση. Αυτή τη φορά θα επιλεγθεί το κουμπί “OK”. Αυτό το βήμα μπορεί να επαναληφθεί όσες φορές χρειαστεί ώστε το επίπεδο θορύβου να μειωθεί σε ικανοποιητικό βαθμό χωρίς να παραμορφώνει το σήμα.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. The Editors of Encyclopaedia Britannica. measurement | Definition, Types, Instruments, & Facts [Internet]. Encyclopedia Britannica. [cited 2021 Sep 28]. Available from: <https://www.britannica.com/technology/measurement>
2. Gajjar MJ. Sensors and actuators. In: Mobile Sensors and Context-Aware Computing [Internet]. Elsevier; 2017 [cited 2021 Sep 6]. p. 37–83. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128016602000033>
3. Nolan DP. Fire and Gas Detection and Alarm Systems. In: Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical, and Related Facilities [Internet]. Elsevier; 2019 [cited 2021 Sep 6]. p. 303–29. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128160022000179>
4. Al-Qatatsheh A, Morsi Y, Zavabeti A, Zolfagharian A, Salim N, Z. Kouzani A, et al. Blood Pressure Sensors: Materials, Fabrication Methods, Performance Evaluations and Future Perspectives. *Sensors*. 2020 Aug 11;20(16):4484.
5. Baura GD. Thermometers. In: Medical Device Technologies [Internet]. Elsevier; 2012 [cited 2021 Sep 6]. p. 257–74. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123749765000128>
6. Introduction to Charge-Coupled Devices (CCDs) [Internet]. Nikon’s MicroscopyU. [cited 2021 Sep 6]. Available from: <https://www.microscopyu.com/digital-imaging/introduction-to-charge-coupled-devices-ccds>
7. MacEachern C, Yıldız İ. 1.16 Wind Energy. In: Comprehensive Energy Systems [Internet]. Elsevier; 2018 [cited 2021 Sep 6]. p. 665–701. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128095973001188>

8. Mehta BR, Reddy YJ. Industrial automation. In: Industrial Process Automation Systems [Internet]. Elsevier; 2015 [cited 2021 Sep 6]. p. 1–36. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128009390000012>
9. Patel DrB, Sinha PG, Goel N. Introduction to sensors. In 2020.
10. Agarwal A, Lang J. 1.8 SIGNAL REPRESENTATION. In: Foundations of Analog and Digital Electronic Circuits. 1st edition. Amsterdam; Boston: Morgan Kaufmann; 2005. p. 40–5.
11. Mayeen A, Kalarikkal N. Development of ceramic-controlled piezoelectric devices for biomedical applications. In: Fundamental Biomaterials: Ceramics [Internet]. Elsevier; 2018 [cited 2021 Sep 29]. p. 47–62. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081022030000020>
12. Nvs B, Saranya PL. Water pollutants monitoring based on Internet of Things. In: Inorganic Pollutants in Water [Internet]. Elsevier; 2020 [cited 2021 Sep 29]. p. 371–97. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128189658000184>
13. Sanderson ML. Electrical Measurements. In: Instrumentation Reference Book [Internet]. Elsevier; 2010 [cited 2021 Sep 29]. p. 439–98. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780750683081000279>
14. Tamura T. Wearable Inertial Sensors and Their Applications. In: Wearable Sensors [Internet]. Elsevier; 2014 [cited 2021 Sep 29]. p. 85–104. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780124186620000246>
15. Gauglitz G. Direct optical sensors: principles and selected applications. Anal Bioanal Chem. 2005 Jan;381(1):141–55.
16. Polizzi J-P, Fain B, Maspero F. Accelerometer. In: Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies [Internet]. Elsevier; 2020 [cited 2021 Sep 29]. p. 879–

98. Available from:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128177860000451>
17. Valero M, Li F, Zhao L, Zhang C, Garrido J, Han Z. Vibration sensing-based human and infrastructure safety/health monitoring: A survey. *Digit Signal Process.* 2021 Jul;114:103037.
18. Decaens J, Vermeersch O. Wearable technologies for personal protective equipment. In: *Smart Textiles and their Applications* [Internet]. Elsevier; 2016 [cited 2021 Sep 29]. p. 519–37. Available from:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081005743000230>
19. Wakui S, Noda A, Akiyama T, Takahashi M. Development of velocity sensor with high frequency band and its application to a vibration isolate table. *Precis Eng.* 2007 Apr;31(2):146–55.
20. Madianos L, Skotadis E, Patsiouras L, Filippidou MK, Chatzandroulis S, Tsoukalas D. Nanoparticle based gas-sensing array for pesticide detection. *J Environ Chem Eng.* 2018 Oct;6(5):6641–6.
21. Estes J, Kline K, Collins E. Remote Sensing. In: *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences* [Internet]. Elsevier; 2001 [cited 2021 Sep 29]. p. 13144–50. Available from:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B0080430767025262>
22. Fraden J. *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications.* 3rd ed. New York: Springer; 2004. 589 p.
23. Vert M, Doi Y, Hellwich K-H, Hess M, Hodge P, Kubisa P, et al. Terminology for biorelated polymers and applications (IUPAC Recommendations 2012). *Pure Appl Chem.* 2012 Jan 11;84(2):377–410.
24. Khan I, Saeed K, Khan I. Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arab J Chem.* 2019 Nov;12(7):908–31.

25. Eustis S, El-Sayed MA. Why gold nanoparticles are more precious than pretty gold: Noble metal surface plasmon resonance and its enhancement of the radiative and nonradiative properties of nanocrystals of different shapes. *Chem Soc Rev.* 2006;35(3):209–17.
26. Kong YL, Gupta MK, Johnson BN, McAlpine MC. 3D printed bionic nanodevices. *Nano Today.* 2016 Jun;11(3):330–50.
27. Min S-H, Lee TH, Lee G-Y, Zontar D, Brecher C, Ahn S-H. Directly Printed Low-Cost Nanoparticle Sensor for Vibration Measurement during Milling Process. *Materials.* 2020 Jun 29;13(13):2920.
28. Min S-H, Quan Y-J, Park S-Y, Lee G-Y, Ahn S-H. Interoperable Nanoparticle Sensor Capable of Strain and Vibration Measurement for Rotor Blade Monitoring. *Sensors.* 2021 May 24;21(11):3648.
29. Yi L, Jiao W, Wu K, Qian L, Yu X, Xia Q, et al. Nanoparticle monolayer-based flexible strain gauge with ultrafast dynamic response for acoustic vibration detection. *Nano Res.* 2015 Sep;8(9):2978–87.
30. Kang D, Pikhitsa PV, Choi YW, Lee C, Shin SS, Piao L, et al. Ultrasensitive mechanical crack-based sensor inspired by the spider sensory system. *Nature.* 2014 Dec;516(7530):222–6.
31. Sencadas V, Mutlu R, Alici G. Large area and ultra-thin compliant strain sensors for prosthetic devices. *Sens Actuators Phys.* 2017 Oct;266:56–64.
32. Aslanidis E, Skotadis E, Tsoukalas D. Resistive crack-based nanoparticle strain sensors with extreme sensitivity and adjustable gauge factor, made on flexible substrates. *Nanoscale.* 2021;13(5):3263–74.
33. Jheng W-W, Su Y-S, Hsieh Y-L, Lin Y-J, Tzeng S-D, Chang C-W, et al. Gold Nanoparticle Thin Film-Based Strain Sensors for Monitoring Human Pulse. *ACS Appl Nano Mater.* 2021 Feb 26;4(2):1712–8.

34. Kester W. Strain, Force, Pressure and Flow Measurements. In: Op Amp Applications Handbook [Internet]. Elsevier; 2005 [cited 2021 Sep 18]. p. 247–56. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780750678445501314>
35. Xiong Y, Tuononen A. A multi-laser sensor system to measure rolling deformation for truck tyres. *Int J Veh Perform*. 2017;3(2):115.
36. Rao CNR, Kulkarni GU, Thomas PJ, Edwards PP. Metal nanoparticles and their assemblies. *Chem Soc Rev*. 2000;29(1):27–35.
37. Herrmann J, Müller K-H, Reda T, Baxter GR, Raguse B, de Groot GJJB, et al. Nanoparticle films as sensitive strain gauges. *Appl Phys Lett*. 2007 Oct 29;91(18):183105.
38. Tanner JL, Mousadakos D, Giannakopoulos K, Skotadis E, Tsoukalas D. High strain sensitivity controlled by the surface density of platinum nanoparticles. *Nanotechnology*. 2012 Jul 20;23(28):285501.
39. Polyimide Film Kapton [Internet]. [cited 2021 Sep 29]. Available from: <http://www.goodfellow.com/A/Polyimide-Film.html>
40. Subramaniam A, Sethuraman S. Biomedical Applications of Nondegradable Polymers. In: Natural and Synthetic Biomedical Polymers [Internet]. Elsevier; 2014 [cited 2021 Sep 29]. p. 301–8. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123969835000193>
41. Han Z, Liu L, Zhang J, Han Q, Wang K, Song H, et al. High-performance flexible strain sensor with bio-inspired crack arrays. *Nanoscale*. 2018;10(32):15178–86.
42. Patsiouras L, Skotadis E, Gialama N, Drivas C, Kennou S, Giannakopoulos K, et al. Atomic layer deposited Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films as humidity barrier coatings for nanoparticle-based strain sensors. *Nanotechnology*. 2018 Nov 16;29(46):465706.
43. Beer FP, Johnston ER Jr, DeWolf john T, Mazurek DF. Τάση και Τροπή - Αξονική Φόρτιση. In: Μηχανική των Υλικών. 6th ed. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑΑ; p. 59–162.

44. Koncar V. Structural health monitoring of processes related to composite manufacturing. In: Smart Textiles for In Situ Monitoring of Composites [Internet]. Elsevier; 2019 [cited 2021 Sep 29]. p. 295–381. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081023082000048>
45. Johnson RW, Hultqvist A, Bent SF. A brief review of atomic layer deposition: from fundamentals to applications. *Mater Today*. 2014 Jun;17(5):236–46.
46. Ott AW, Klaus JW, Johnson JM, George SM. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin film growth on Si(100) using binary reaction sequence chemistry. *Thin Solid Films*. 1997 Jan;292(1–2):135–44.
47. Gordon RG. ALD Precursors and Reaction Mechanisms. In: Hwang CS, editor. *Atomic Layer Deposition for Semiconductors* [Internet]. Boston, MA: Springer US; 2014 [cited 2021 Oct 4]. p. 15–46. Available from: [http://link.springer.com/10.1007/978-1-4614-8054-9\\_2](http://link.springer.com/10.1007/978-1-4614-8054-9_2)
48. Elliot AJ, Ma C, Lu R, Xin M, Han S, Wu JZ, et al. Controlling the thickness of Josephson tunnel barriers with atomic layer deposition. :6.
49. Lévy F. *Film Growth and Epitaxy: Methods*. :16.
50. Bashir A, Awan TI, Tehseen A, Tahir MB, Ijaz M. Interfaces and surfaces. In: *Chemistry of Nanomaterials* [Internet]. Elsevier; 2020 [cited 2021 Oct 4]. p. 51–87. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128189085000032>
51. Acsente T, Gabriela Carpen L, Matei E, Bită B, Negrea R, Bernard E, et al. Tungsten Nanoparticles Produced by Magnetron Sputtering Gas Aggregation: Process Characterization and Particle Properties. In: Mieno T, Hayashi Y, Xue K, editors. *Progress in Fine Particle Plasmas* [Internet]. IntechOpen; 2020 [cited 2021 Oct 4]. Available from: <https://www.intechopen.com/books/progress-in-fine-particle-plasmas/tungsten-nanoparticles-produced-by-magnetron-sputtering-gas-aggregation-process-characterization-and>

52. McCarthy PT, Reifenberger RG, Fisher TS. Thermionic and Photo-Excited Electron Emission for Energy-Conversion Processes. *Front Energy Res* [Internet]. 2014 Dec 9 [cited 2021 Oct 4];2. Available from: <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fenrg.2014.00054/abstract>
53. Kerdcharoen T, Wongchoosuk C. Carbon nanotube and metal oxide hybrid materials for gas sensing. In: *Semiconductor Gas Sensors* [Internet]. Elsevier; 2013 [cited 2021 Oct 4]. p. 386–407. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780857092366500113>
54. administrator. Shadow mask pros and cons. *Photomask or Shadow Mask?* [Internet]. 2017 [cited 2021 Oct 4]. Available from: <https://www.photosciences.com/shadow-mask-pros-cons/>
55. Keithley 2400 Standard Series SMU [Internet]. [cited 2021 Sep 29]. Available from: <https://www.tek.com/keithley-source-measure-units/keithley-smu-2400-standard-series-sourcemeater>
56. Brice R. Shout – Loudspeakers. In: *Music Engineering* [Internet]. Elsevier; 2001 [cited 2021 Sep 30]. p. 416–34. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780750650403500348>
57. Foundation B. blender.org - Home of the Blender project - Free and Open 3D Creation Software [Internet]. blender.org. [cited 2021 Sep 29]. Available from: <https://www.blender.org/>
58. Admin. Best Large Build Volume 3D Printer - Pro2 Plus | \$5,999 | Raise3D [Internet]. Raise3D: Reliable, Industrial Grade 3D Printer. [cited 2021 Sep 29]. Available from: <https://www.raise3d.com/products/pro2-plus-3d-printer/>
59. Dekker R. A Simple Method to Measure Unknown Inductors [Internet]. dos4ever.com. [cited 2021 Oct 7]. Available from: <https://www.dos4ever.com/inductor/inductor.html>

60. Griffiths DJ. Introduction to electrodynamics. 3rd ed. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall; 1999. 576 p.
61. Keithley Ultra-sensitive Current Sources Series 6200 [Internet]. [cited 2021 Sep 29]. Available from: <https://www.tek.com/keithley-low-level-sensitive-and-specialty-instruments/keithley-ultra-sensitive-current-sources-seri>
62. Akasa Thermal Solution [Internet]. [cited 2021 Oct 6]. Available from: <https://www.akasa.com.tw/search.php?seed=AK-TT12-80>
63. Audacity [Internet]. Audacity ®. [cited 2021 Sep 29]. Available from: <https://www.audacityteam.org>