



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Διπλωματική εργασία:

*Υπολογισμός Ιδιοσυχνοτήτων με Εφαρμογή Μεθόδου Πεπερασμένων
Στοιχείων και Πειραματική Επιβεβαίωση με Χρήση Πιεζοηλεκτρικού
Κρυστάλλου για Μεταλλικό Δοχείο*

Υπό

Νικόλαου Π. Νικολιδάκη

ΑΜ:2017010004

Επιβλέπων καθηγητής: Γεώργιος Σταυρουλάκης

1^ο Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής: Παναγιώτης Αλευράς

2^ο Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής: Μαρία Μπακατσάκη

Χανιά Μάϊος 2024

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφιερώνεται στην οικογένεια μου.

*Στον παππού μου Νικολή και την γιαγιά μου Ευαγγελία,
στην μνήμη του παππού μου Αντώνη και της γιαγιάς μου Δέσποινας,
στους γονείς μου, στις αδελφές μου και στον ξάδελφο μου Γιάννη.*

Το παρακάτω ριζίτικο μου το έμαθε ο παππούς μου ο Νικολής,

Το οποίο αποτελεί για μένα πηγή έμπνευσης και σιάση ζωής.

Γιέ μου κι' αν πας στο καπηλειό και βρεις τσι χαροκόπους

ντήρα, διαντήρα το σκαμνί, την τάβλα που καθίζεις

με τον καλιά σου κάθιζε και νηστικός σηκώνου

να σε τιμούν οι γι-άρχοντες, να σε τιμά κι' ο τόπος.

Περίληψη Διπλωματικής

Η εξέλιξη των υπολογιστικών και τεχνολογικών μέσων στο πέρασμα του χρόνου αποτέλεσε αδιαμφισβήτητα μια σημαντική βοήθεια για τους επιστήμονες , ερευνητές ,μηχανικούς και γενικά επαγγελματίες που ενασχολούνται στον τομέα των θετικών επιστήμων. Ολοένα και πιο αποδοτικά μηχανήματα έκαναν την εμφάνιση τους στον χώρο της επιστήμης. Δημιουργήθηκαν λογισμικά ικανά να επιλύσουν προβλήματα που μέχρι πρότινος ήταν αδύνατη η λύση τους. Ενώ τελευταία η τεχνητή νοημοσύνη έχει εισέλθει δυναμικά στις επιστήμες αλλάζοντας τον τεχνολογικό χάρτη του μέλλοντος . Αυτή η εξέλιξη οδήγησε τους ανθρώπους στην ανάγκη για την δημιουργία λογισμικών τα οποία θα είναι ικανά να προβλέψουν τα αποτελέσματα μιας πειραματικής μελέτης πρώτου αυτή πραγματοποιηθεί είτε λόγω υψηλού κόστος μελέτης ,είτε για ελαχιστοποίηση του χρόνου διεξαγωγής του πειράματος. Ένα από αυτά τα προγράμματα αποτέλεσε θρυαλλίδα για την συγγραφή της παρούσας διπλωματικής, καθώς πραγματεύεται την μοντελοποίηση ενός πειράματος σε υπολογιστικό πρόγραμμα. Σκοπός της μελέτης είναι μετά από λεπτομερή σχεδίαση ενός μεταλλικού δοχείου και την χρήση των πεπερασμένων στοιχείων μέσω του λογισμικού Comsol Multiphysics, να γίνει η εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων που παράγονται κατά την κρούση του αντικειμένου αλλά και οι αντίστοιχες ιδιομορφές τους. Τέλος για την εξακρίβωση των αποτελεσμάτων που συλλέχθηκαν από το πρόγραμμα, θα γίνει και πειραματική επιβεβαίωση με την χρήση πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου .

ABSTRACT

The discovery and evolution of computing and technological tools over time has undoubtedly been an important aid for scientists, researchers, engineers and general professionals involved in the field of science. Increasingly efficient machines made their appearance in the field of science. Software capable of solving problems that until recently were impossible to solve were created. While recently artificial intelligence has entered the sciences in a big way, changing the technological map of the future . This development has led people to the need to create software that will be able to predict the results of an experimental study first carried out either because of high study costs, or to minimize the time of conducting the experiment. One of these programs was the catalyst for the writing of this thesis, as it deals with the modelling of an experiment in a computer program. The aim of the study is, after a detailed design of a metallic container and the use of finite elements through the Comsol Multiphysics software, to find the eigenfrequencies generated during the impact of the object and their corresponding eigenmodes. Finally, in order to verify the results collected by the program, an experimental confirmation will be made using a piezoelectric crystal

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους οι οποίοι υπήρξαν αρωγοί στην υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επιβλέποντα της εργασίας κ. Γεώργιο Σταυρουλάκη για την πολύτιμη βοήθεια του καθ' όλη την πορεία της εργασίας καθώς και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου αυτή την διπλωματική.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Νικόλαο Παπαδάκη διδάκτορα της σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης του οποίου η βοήθεια ήταν καταλυτική για την διεκπεραίωση της εργασίας. Καθώς και για την καθοριστική του συμβολή στο πειραματικό σκέλος της εργασίας που χωρίς την βοήθεια του δεν θα ήταν δυνατή η υλοποίηση του πειράματος.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου -Στέλιο, Μανώλη, Χρήστο- για την συμπαράσταση τους, σε όλη την διάρκεια της φοιτητικής μου ζωής, καθώς και για τις αξέχαστες εμπειρίες που ζήσαμε μαζί οι οποίες έχουν χαραχτεί μέσα μου και θα τις θυμάμαι για μια ζωή.

Τέλος οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υποστήριξη της σε όλη την περίοδο της ζωής μου, τις αρχές και το ήθος που μου μεταλαμπάδευσαν, συμβάλλοντας καθοριστικά στο άτομο που είμαι σήμερα. Ενώ θα ήθελα να ευχαριστήσω και το σκυλάκι μου την Λούνα που μπορεί να μην το καταλαβαίνει αλλά μου ομορφαίνει καθημερινά την μέρα.

Νικόλαος Π. Νικολιδάκης

Χανιά, Μάιος 2024

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο της Εργασίας	1
2. Βασικές έννοιες ανάλυσης	2
3. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.	7
3.1 Ιστορικά στοιχεία:	7
3.2 Επισκόπηση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων:.....	7
3.3 Εφαρμογές της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων:	11
3.4 Αξιοποίηση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων μέσω της ηλεκτρονικής μοντελοποίησης για την εύρεση ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών ενός αντικειμένου 11	
3.5 Συμπεράσματα:	12
4. NX SIEMENS	13
4.1 Σχεδιασμός μοντέλου	13
5. Comsol Multiphysics	21
5.1 Αρχικές ρυθμίσεις	22
5.2 Εισαγωγή του υλικού στο μοντέλο.	25
5.3 Διακριτοποίηση (meshing) του μοντέλου.....	27
5.4 Επίλυση του προβλήματος.....	30
5.5 Ανάλυση των αποτελεσμάτων	32
6. Πειραματικό Σκέλος	36
6.1 Θεωρία του πειράματος	36
6.2 Περιγραφή του πειράματος	37
6.3 Πειραματικά αποτελέσματα	43
6.3.1 Μετρήσεις στην θέση (M1,S1).....	43
6.3.2 Μετρήσεις στην θέση (M1,S2).....	46
6.3.3 Μετρήσεις στην θέση (M2,S1).....	49
6.3.4 Μετρήσεις στην θέση (M2,S2).....	52
6.3.5 Μέτρηση με την χρήση μικροφώνου	56
6.4 Συμπεράσματα πειράματος	58

7. Σύγκριση Υπολογιστικών και Πειραματικών Δεδομένων	59
7.1 Καινούργιο Υπολογιστικό Μοντέλο	60
8. Συμπεράσματα και προτάσεις για το μέλλον	71
9. Βιβλιογραφία-Αναφορές	74

1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της Εργασίας

Σχεδόν όλα τα σώματα τείνουν να δονούνται κατά κύριο λόγο σε συγκεκριμένη συχνότητα (ή συχνότητες) όταν τα χτυπάμε, τα τρίβουμε, τα τεντώνουμε και τ' αφήνουμε απότομα, τα διαταράσσουμε ξαφνικά κλπ. Οι συχνότητες αυτές καλούνται φυσικές συχνότητες ή ιδιοσυχνότητες των συγκεκριμένων αντικειμένων[4]. Ενώ παράλληλα κάθε μια από αυτές τις ιδιοσυχνότητες έχει και μια ιδιομορφή η οποία αναπαριστά πως ταλαντώνεται το αντικείμενο. Αυτές τις ιδιοσυχνότητες μπορεί να τις υπολογίσει κάποιος πειραματικά με ένα φασματογράφο ή για να έχει πιο ακριβή αποτελέσματα με την χρήση πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου

Η παρούσα διπλωματική στηριζόμενη στον εξαιρετικά ενδιαφέρον κόσμο των πεπερασμένων στοιχείων πραγματεύεται την μοντελοποίηση ενός πειραματικού/πραγματικού προβλήματος σε υπολογιστικό πρόγραμμα και την εξαγωγή των ιδιοσυχνοτήτων/ιδιομορφών που παράγονται κατά τον συντονισμό και την κρούση του αντικείμενου. Για αυτό τον λόγο η εργασία θα χωριστεί σε τέσσερα μέρη.

Στο πρώτο μέρος παραθέτονται ιστορικά στοιχεία τις Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) ,αναλύεται ο τρόπος επίλυσης της μεθόδου αλλά και το ευρύ φάσμα προβλημάτων που μπορεί να καλύψει και να εξάγει σωστά και τεκμηριωμένα αποτελέσματα. Επίσης αναλύονται διάφορες βασικές έννοιες και μεταβλητές που απαρτίζουν το πρόβλημα.

Στο δεύτερο μέρος γίνεται η τρισδιάστατη σχεδίαση του αντικείμενου. Αναλύονται τα βήματα που έγιναν στο περιβάλλον σχεδίασης του NX SIEMENS καθώς και φωτογραφικό υλικό από το εργαστήριο μικροκοπής του πολυτεχνείου όπου έγιναν διάφορες μετρήσεις για τις διαστάσεις του αντικείμενου. Έπειτα γίνεται εισαγωγή στο περιβάλλον του Comsol Multiphysics ,αναφέρονται κάποια ιστορικά στοιχεία αλλά και τις δυνατότητες που παρέχει το συγκεκριμένο πρόγραμμα. Έπειτα παρουσιάζεται βηματικά η μοντελοποίηση του δοχείου στο περιβάλλον του Comsol Multiphysics και αναλύονται τα αποτελέσματα.

Το τρίτο μέρος της εργασίας αφορά το πειραματικό κομμάτι της. Δηλαδή αναλύονται διάφορες έννοιες ταλάντωση, γίνεται η αναλυτική περιγραφή του πειράματος με φωτογραφικό υλικό. Ενώ εξάγονται και τα αποτελέσματα δηλαδή οι ιδιοσυχνότητες.

Στο τέταρτο και τελευταίο μέρος συγκρίνονται τα υπολογιστικά με τα πειραματικά δεδομένα και παραθέτονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας.

2. Βασικές έννοιες ανάλυσης

Μέτρο ελαστικότητας (Young's Modulus):

Είναι μια σταθερά η οποία χρησιμοποιείται στην μηχανική των υλικών για να περιγράψει την σκληρότητα και την ελαστικότητα ενός υλικού. Η σταθερά του Young αντικατοπτρίζει την αντίδραση του υλικού όταν εφαρμόζεται μια δύναμη σε αυτό. Μαθηματικά το μέτρο ελαστικότητας δίνεται από την κλίση της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης στην περιοχή της ελαστικής παραμόρφωσης. Συγκεκριμένα ένα υλικό με υψηλό μέτρο ελαστικότητας (Young's Modulus) θα επιμηκύνεται ελάχιστα ή θα συμπιέζεται ελάχιστα όταν του εφαρμόζεται κάποια δύναμη, δηλαδή θα το περιγράφαμε 'σκληρό', ενώ ένα υλικό με χαμηλό μέτρο ελαστικότητας (Young's Modulus) θα επιμηκύνεται περισσότερο ή θα συμπιέζεται περισσότερο όταν του εφαρμόζεται δύναμη, δηλαδή θα είναι ελαστικό. Μονάδα μέτρησης του μέτρου ελαστικότητας (Young's Modulus) στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI) είναι το Πασκάλ (Pa).[1]

$$E \equiv \frac{\text{tensile stress}}{\text{tensile strain}} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A_0}{\Delta L/L_0} = \frac{F L_0}{A_0 \Delta L} \quad (2.1)$$

Εξίσωση που περιγράφει την σταθερά Young's Modulus

Όπου:

σ : Τάση

ε : Παραμόρφωση

F: Ασκούμενη δύναμη

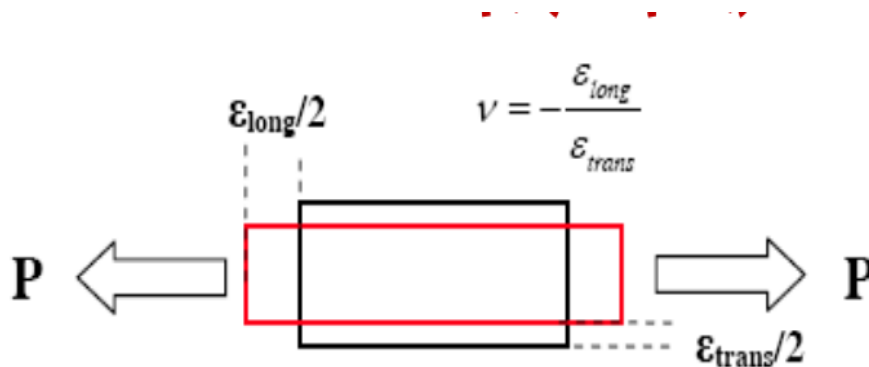
A_0 : Αρχική διατομή

ΔL : Μεταβολή μήκους

L_0 : Αρχικό μήκος

Λόγος Poisson : Είναι ένας σημαντικός λόγος που χρησιμοποιείται στην μηχανική των υλικών και των σχεδιασμό των υλικών καθώς επηρεάζει τον τρόπο που ένα υλικό απορροφά και μεταφέρει τις εξωτερικές δυνάμεις που του ασκούνται . Κατά τον αξονικό εφελκυσμό ενός στοιχείου, η επιμήκυνση του στοιχείου συνοδεύεται από μια μείωση της διατομής του. Αντίθετα στην θλίψη έχουμε βράχυνση του στοιχείου και αύξηση της διατομής του . Όταν ένα υλικό παρουσιάζει θετικό συντελεστή Poisson συμπεραίνουμε ότι σε περίπτωση επιμήκυνσης ενός στοιχειώδους τμήματος κατά τη διαμήκη διεύθυνση λόγω αξονικής εφελκυστικής δύναμης θα παρατηρηθεί βράχυνση του στοιχειώδους τμήματος στις άλλες δύο διευθύνσεις[2]. Οι τιμές του λόγου του Poisson κυμαίνονται από -1 μέχρι το 0.5 για τα περισσότερά υλικά ενώ μια ενδεικτική τιμή για τα μέταλλα είναι το 0.3. [1]

$$\nu = - \frac{\epsilon_{long}}{\epsilon_{trans}} \quad (2.2)$$



Εικόνα 2.1 Ο λόγος του Poisson ορίζεται ως ο αρνητικός λόγος της εγκάρσιας προς τη διαμήκη παραμόρφωση του υλικού όταν αυτό εντείνεται ομοαξονικά κατά τη διαμήκη διεύθυνση.[2]

Δυσκαμψία κάμψης: Οι φυσικές συχνότητες των πλακών εξαρτώνται από τη δυσκαμψία κάμψης της πλάκας, D , και από τη μάζα ανά μονάδα επιφάνειας . Για ένα ισότροπο ελαστικό υλικό, η δυσκαμψία κάμψης είναι

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (2.3)$$

Όπου :

E: Young's Modulus (Μέτρο Ελαστικότητας)

h: Πάχος περιβλήματος

ν : Λόγος Poisson

Οι ιδιοσυχνότητες και οι ιδιομορφές εξαρτώνται από τη γεωμετρία της πλάκας και από τις συνθήκες στήριξης στα άκρα. Οι ιδιοσυχνότητες έχουν τη μορφή

$$\omega_{mn} = k_{s,mn} \frac{1}{size^2} \sqrt{\frac{D}{\mu}} \quad (2.4)$$

Όπου :

μ : Μάζα ανά μονάδα επιφάνειας

size: Γεωμετρία περιβλήματος

mn: οποιαδήποτε θετική ακέραια τιμή

Περίβλημα με άκαμπτα τοιχώματα : Η παραγωγή ενός μοτίβου διάδοσης του ήχου σε ένα περίβλημα λόγω πολλαπλών ανακλάσεων είναι αρκετά περίπλοκη. Επομένως, κατά τη μοντελοποίηση του ήχου σε κλειστούς χώρους, πρέπει να πραγματοποιείται ανάλυση των ιδιομορφών του περιβλήματος[3]. Στην παρούσα ενότητα εξετάζονται αρχικά οι φυσικές συχνότητες της πλάκας και του περιβλήματος.

Η εξίσωση Helmholtz, η οποία περιγράφει μια εξίσωση αρμονικού κύματος που διαδίδεται στο μέσο, αμελώντας τη διάχυση, παριστάνεται ως εξής

$$\nabla^2 + k^2 p = 0, \quad (2.5)$$

όπου p είναι το μιγαδικό πλάτος ηχητικής πίεσης και k ο κυματικός αριθμός που σχετίζεται με τη γωνιακή συχνότητα ω και την ταχύτητα του ήχου c_s ως εξής:

$$k = \frac{\omega}{c_s}. \quad (2.6)$$

Αντικαθιστώντας την (2.6) στην (2.5) και εισάγοντας την πυκνότητα του αέρα ρ_0 [17] προκύπτει μια ομογενής εξίσωση Helmholtz:

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} (\nabla p) \right) - \frac{\omega^2 p}{\rho_0 c_s^2} = 0 \quad (2.7)$$

Επιπλέον, η ιδιοτιμή λ σχετίζεται με την ιδιοσυχνότητα ως εξής:

$$\lambda = i2\pi f = i\omega \quad (2.8)$$

Αντικαθιστώντας την (2.8) στην (2.7) και επεκτείνοντας σε τρεις διαστάσεις το περίβλημα μπορεί να γραφεί ως εξής

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \frac{\lambda^2 p}{\rho_0 c_s^2} = 0 \quad (2.9)$$

Οι φυσικές συχνότητες του ακουστικού συστήματος μελετώνται υποθέτοντας ότι τα όρια του περιβλήματος είναι σκληρά, επομένως οι κλίσεις πίεσης σε όλα τα όρια μηδενίζονται:

$$\begin{aligned} P_x|_x = 0, \quad P_x|_x = L_x, \quad P_y|_y = 0, \quad (2.10) \\ P_y|_y = L_y, \quad P_z|_z = 0, \quad P_z|_z = L_z \end{aligned}$$

Η λύση του (2.7) με τις συνοριακές συνθήκες που εισάγονται στο (2.10) δίνεται ως εξής

$$\begin{aligned} P_{n_x n_y n_z} = A \cos\left(\frac{n_x \pi x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{n_y \pi y}{L_y}\right) \cos\left(\frac{n_z \pi z}{L_z}\right), \quad (2.11) \\ \text{with } n_x, n_y, n_z = 0, 1, 2, \dots, \end{aligned}$$

Όπου n_x, n_y και n_z είναι ο αριθμός των τρόπων λειτουργίας. Παραγοντοποιώντας το [2.6], οι ιδιοσυχνότητες του περιβλήματος μπορούν να γραφούν περαιτέρω ως εξής

$$f_{n_x n_y n_z} = \frac{c_s}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad (2.12)$$

3. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ) αποτελεί μια ισχυρή αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιείται στη μηχανική και τα εφαρμοσμένα μαθηματικά για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων που αφορούν φυσικές δομές και φαινόμενα. Παρέχει μια συστηματική προσέγγιση λύσεων διαφορικών εξισώσεων, καθιστώντας την απαραίτητο εργαλείο για μηχανικούς και επιστήμονες σε διάφορους κλάδους.

3.1 Ιστορικά στοιχεία:

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μία από τις επιδραστικότερες επιστημονικές εξελίξεις στον τομέα της μηχανικής, κυρίως κατά το δεύτερο μισό του 20ού αιώνα. Η ιδέα αυτή οφείλεται στον Έλληνα μηχανικό-ερευνητή Τζον Αργύρη, ο οποίος προσπάθησε να αντιμετωπίσει το πρόβλημα σχεδιασμού αεροσκαφών στα τέλη του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου.

Πρωτοπόροι στην ανάπτυξη αυτής της επιστήμης ήταν ο Hrennikoff με τις θεωρίες του για το δίκτυο ράβδων, ο McHenry που επέκτεινε τη θεωρία σε μοντέλα στερεών τριών διαστάσεων, καθώς και ο Courant και ο Levy με τις επιδράσεις στη μεταβλητή μορφή και την ελαστικότητα-δυσκαμψία. Η τυπική διατύπωση της μεθόδου παρουσιάστηκε πλήρως το 1954 από τον T. Αργύρη και τον S. Kelsey στο έργο τους "Αρχές Ενέργειας".

Η εξέλιξη της μεθόδου προχώρησε σημαντικά την δεκαετία του '70 με εφαρμογές σε μεγάλα συστήματα υπολογιστών, την ανάπτυξη μικροϋπολογιστών τη δεκαετία του '80, και την ανάλυση μεγάλων κατασκευών τη δεκαετία του '90. Από τότε και στο εξής, η ανάπτυξη της μεθόδου συμβαδίζει με την εξέλιξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η συνεργασία αυτή επιτρέπει την αντιμετώπιση προβλημάτων μηχανικής που θεωρούνταν αδύνατα να επιλυθούν πριν από λίγα χρόνια, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων να οδηγεί σε αλγεβρικά συστήματα περιορισμένων διαφορικών εξισώσεων, τα οποία επιλύονται με τη βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών.[6]

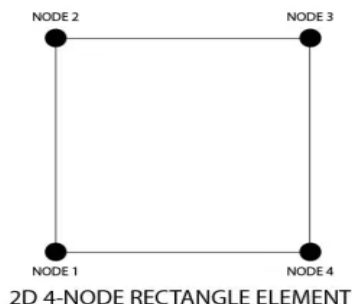
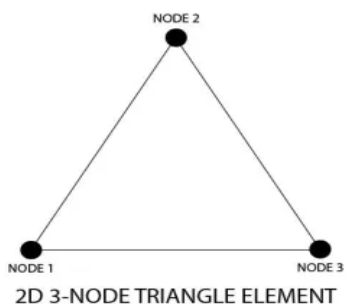
3.2 Επισκόπηση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων:

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αντιπροσωπεύει μια τεχνική προσέγγιση για την προσομοίωση πραγματικών κατασκευών με τη χρήση διακριτών στοιχείων που

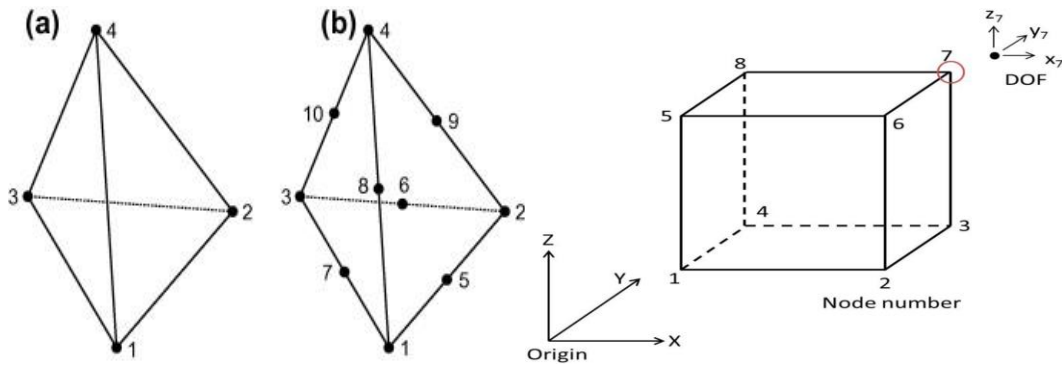
συνδέονται μέσω κόμβων. Στην ουσία, αναλύει την δομή της κατασκευής χρησιμοποιώντας στοιχεία, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους σε πεπερασμένους κόμβους. Ενώ αυτή η προσέγγιση είναι φυσιολογική για πλαίσια που αποτελούνται από δοκούς, σε συνεχείς κατασκευές πρέπει να γίνει μια τεχνητή διάκριση σε στοιχεία που συνδέονται κατά μήκος των άκρων τους. Αυτά τα τεχνητά στοιχεία, ή πεπερασμένα στοιχεία, συνήθως είναι τετράπλευρα ή τριγωνικά, με τους κόμβους να βρίσκονται κυρίως στα άκρα.

Για να χρησιμοποιηθεί η μητρωϊκή μέθοδος, η συνεχής κατασκευή πρέπει να προσομοιωθεί με ένα πεπερασμένο αριθμό διακριτών μεταβλητών. Αυτές οι μεταβλητές είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων και, σε ορισμένες περιπτώσεις, οι παράγωγοί τους. Εάν περιληφθούν οι παράγωγοι, μιλάμε για βαθμούς ελευθερίας αντί για μετατοπίσεις κόμβων. Οι μετατοπίσεις στο εσωτερικό των στοιχείων πρέπει να είναι συμβατές με τις μετατοπίσεις των κόμβων, και όλες οι αλληλεπιδράσεις των στοιχείων εκφράζονται σε σχέση με αυτές τις κομβικές μετατοπίσεις. Κατά αυτόν τον τρόπο, οι μόνοι άγνωστοι είναι οι μετατοπίσεις στους κόμβους, μετατρέποντας έτσι το πρόβλημα από συνεχές σε διακριτό. Αν και ο αριθμός των κομβικών μετατοπίσεων μπορεί να είναι μεγάλος, είναι πεπερασμένος. Επομένως, το πρόβλημα εκφράζεται ως ένα σύνολο γραμμικών εξισώσεων που λύνονται με αριθμητικές μεθόδους.[6]

Στον πυρήνα της, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων διακριτοποιεί ένα συνεχές φυσικό σύστημα σε πεπερασμένο αριθμό απλών γεωμετρικών στοιχείων, όπως τρίγωνα ή τετράγωνα σε 2 διαστάσεις, τετράεδρα ή εξάεδρα σε 3 διαστάσεις. Αυτά τα στοιχεία σχηματίζουν ομαδικά ένα πλέγμα (mesh). Μία πολύπλοκη κατασκευή αναλύεται σε ένα πλέγμα πεπερασμένου αριθμού στοιχείων απλού σχήματος.



Εικόνα 3.2.1τρίγωνα και τετράγωνα στοιχεία

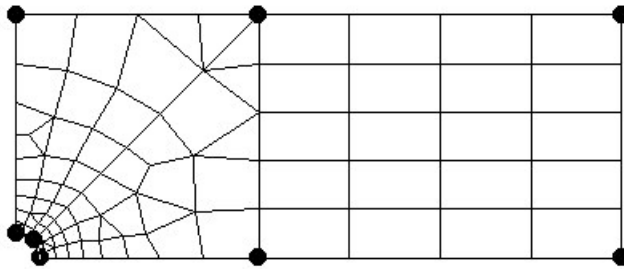


Εικόνα 3.2.2 τετράεδρα και εξάεδρα στοιχεία

Βασικά βήματα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων:

Διακριτοποίηση:

Το πρώτο βήμα είναι η διαίρεση του πεδίου σε στοιχεία. Κάθε στοιχείο έχει ένα σύνολο κόμβων και η φυσική συμπεριφορά εντός κάθε στοιχείου προσεγγίζεται με τη χρήση συναρτήσεων παρεμβολής. Η επιλογή της κατάλληλης πυκνότητας πεπερασμένων στοιχείων του πλέγματος (mesh density) είναι σημαντικός παράγοντας επιτυχίας του μοντέλου, προκειμένου να επιλυθεί το υπό μελέτη πρόβλημα. Συγκεκριμένα, ένα υπερβολικά αραιό πλέγμα δυσκολεύει τη σωστή αναπαράσταση του φαινομένου, ενώ ένα υπερβολικά λεπτομερές πλέγμα, με περισσότερα στοιχεία από όσα είναι πρακτικά αναγκαίο, αυξάνει το κόστος υπολογιστικού χρόνου χωρίς σημαντικό όφελος στην ακρίβεια της ανάλυσης. Συνεπώς, η βέλτιστη επιλογή πυκνότητας προϋποθέτει ισορροπία μεταξύ επαρκούς λεπτομέρειας για την ακριβή αναπαράσταση του προβλήματος αλλά και ελαχιστοποίηση του υπολογιστικού χρόνου.[7][19]



Εικόνα 3.2.3:διακριτοποίηση συγκεκριμένης περιοχής με πεπερασμένα στοιχεία-βαθμιαία ελάττωση του μεγέθους των στοιχείων

Η βαθμιαία μεταβολή του μεγέθους των στοιχείων είναι ένας εφικτός τρόπος ελάττωσης του κόστους χωρίς να μειωθεί ακρίβεια της λύσης του προβλήματος. Λόγω όμως της μμεγάλης ποικιλίας κατασκευών και φορτίσεων δεν είναι δυνατό να δοθεί γενικός κανόνας σχετικά με τον αριθμό ή το μέγεθος των στοιχείων ή τον τρόπο διακριτοποίησης που απαιτούνται για επαρκή ακρίβεια. Σε κάθε περίπτωση ο τρόπος διακριτοποίησης πρέπει να βασίζεται στην εμπειρία συμπεριφοράς και μμελέτης παρόμοιων κατασκευών. Εάν αυτό δεν είναι εφικτό πρέπει να επιλυθεί σειρά προβλημάτων με διαφορετικές διακριτοποίησης και να υπολογισθεί ο βαθμός σύγκλισης στην ακριβή λύση[6]. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται η ακρίβεια της λύσης για το συγκεκριμένο πρόβλημα (Εικόνα 3.2.3)

Διατύπωση των εξισώσεων των στοιχείων:

Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία ενός συνόλου εξισώσεων για κάθε στοιχείο. Εξισώνοντας τις τιμές των κόμβων βρίσκουμε την τοπική συμπεριφορά κάθε στοιχείου.

Συναρμολόγηση:

Αφού διατυπωθούν οι εξισώσεις των στοιχείων, συναρμολογούνται για να σχηματίσουν το συνολικό σύστημα εξισώσεων για ολόκληρο το πρόβλημα. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει το συνδυασμό των επιμέρους συνεισφορών κάθε στοιχείου σε μια συνολική εξίσωση πίνακα.

Εφαρμογή των οριακών συνθηκών:

Οι οριακές συνθήκες είναι απαραίτητες για την αναπαράσταση των περιορισμών ή των εξωτερικών επιδράσεων στο σύστημα. Η εφαρμογή αυτών των συνθηκών βοηθά στην επίλυση του συστήματος εξισώσεων και στην απόκτηση μιας ουσιαστικής λύσης.

Λύση:

Το σύστημα εξισώσεων επιλύεται στη συνέχεια, συνήθως με τη χρήση αριθμητικών τεχνικών, όπως αντιστροφή πινάκων ή επαναληπτικοί επιλυτές, για τον προσδιορισμό των αγνώστων (κομβικές τιμές) και την απόκτηση της προσεγγιστικής λύσης για ολόκληρο το πεδίο.

3.3 Εφαρμογές της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων:

Δομική ανάλυση:

Η ΜΠΣ χρησιμοποιείται ευρέως στη δομική μηχανική για την ανάλυση και το σχεδιασμό κτιρίων, γεφυρών και άλλων κατασκευών υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης.

Μεταφορά θερμότητας και δυναμική ρευστών:

Εφαρμόζεται για τη μοντελοποίηση και προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας και της ροής ρευστών, βοηθώντας στο σχεδιασμό θερμικών συστημάτων και στη βελτιστοποίηση της δυναμικής ρευστών σε μηχανολογικές εφαρμογές.

Ηλεκτρομαγνητική:

Η ΜΠΣ βρίσκει εφαρμογές στη μοντελοποίηση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, βοηθώντας στο σχεδιασμό συσκευών όπως αισθητήρες, ενεργοποιητές και κεραίες.

3.4 Αξιοποίηση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων μέσω της ηλεκτρονικής μοντελοποίησης για την εύρεση ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών ενός αντικειμένου

Όταν ένα αντικείμενο δονείται σε μια συγκεκριμένη ιδιοσυχνότητα τότε παραμορφώνεται σε ένα αντίστοιχο μοναδικό σχήμα, την ιδιομορφή. Μια ανάλυση ιδιοσυχνότητας μπορεί να παρέχει μόνο το σχήμα της ιδιομορφής και όχι το πλάτος οποιασδήποτε φυσικής δόνησης. Το πραγματικό μέγεθος της παραμόρφωσης μπορεί να προσδιοριστεί μόνο εάν είναι γνωστή μια πραγματική διέγερση μαζί με τις ιδιότητες

απόσβεσης. Ο προσδιορισμός των ιδιοσυχνοτήτων μιας κατασκευής αποτελεί σημαντικό μέρος της δομικής μηχανικής

Η ηλεκτρονική μοντελοποίηση και ανάλυση αποτελούν έναν εξαιρετικά χρήσιμο τρόπο για την εύρεση των τρόπων δόνησης ενός αντικειμένου (Ιδιομορφές). Με αυτήν την μέθοδο, μπορούμε να ανακαλύψουμε τους τρόπους δόνησης ενός αντικειμένου που είναι περίπλοκοι ή δύσκολοι να μελετηθούν πειραματικά. Επιπλέον, αυτή η μέθοδος μπορεί να λειτουργήσει ως έλεγχος ορθότητας για να διασφαλίσουμε ότι τα πειραματικά αποτελέσματα συμφωνούν με τις θεωρητικές προβλέψεις. Η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία είναι μια αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιείται για να διακριβωθούν οι δονήσεις ενός αντικειμένου, διασπώντας την σε μικρά τμήματα (πεπερασμένα στοιχεία) και επιλύοντας τις αντίστοιχες εξισώσεις που τις διέπουν. Στη συνέχεια, συνδυάζει αυτά τα αποτελέσματα για να προβλέψει τη συμπεριφορά του αντικειμένου υπό δονήσεις.[5]

3.5 Συμπεράσματα:

Συνοψίζοντας, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχει γίνει αναπόσπαστο μέρος της μηχανικής και των επιστημονικών προσομοιώσεων, επιτρέποντας την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση πολύπλοκων συστημάτων. Καθώς οι υπολογιστικές δυνατότητες συνεχίζουν να εξελίσσονται, το ίδιο συμβαίνει και με το εύρος των εφαρμογών της ΜΠΣ, καθιστώντας την ένα διαρκώς εξελισσόμενο και απαραίτητο εργαλείο για την επίλυση προκλήσεων της μηχανικής του πραγματικού κόσμου.

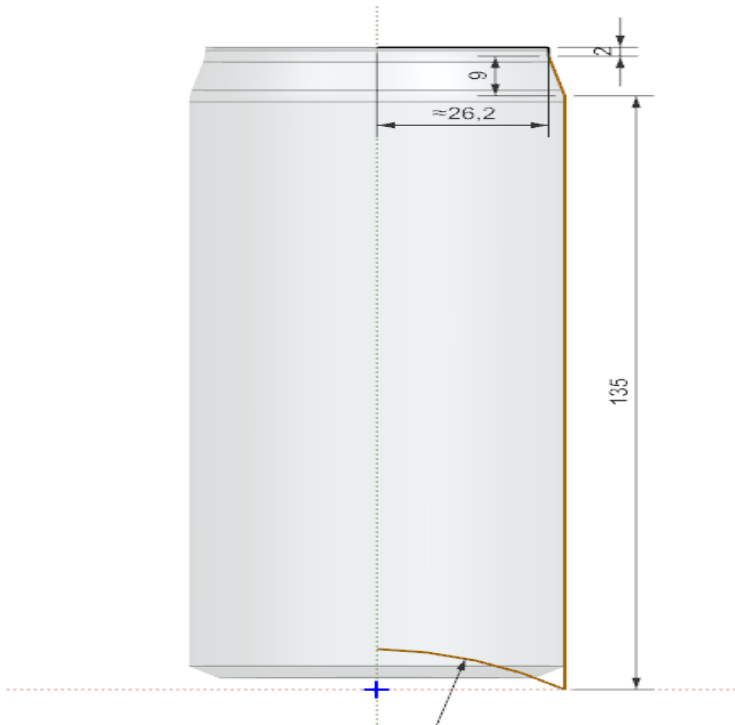
4. NX SIEMENS

Το Siemens NX είναι εύχρηστο λογισμικό CAD (Computer Aided Design), σχεδιασμένο για τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων στον υπολογιστή. Τα μοντέλα αυτά, που είναι επίσης γνωστά ως εικονικά ή ψηφιακά μοντέλα, διότι βρίσκονται μόνο στον υπολογιστή στην φάση της σχεδίασης. Κυρίως επικεντρωμένα στα στερεά μοντέλα, το Siemens NX επιτυγχάνει πλήρη κατανόηση της τοπολογίας του σχεδιαζόμενου αντικειμένου δηλαδή που υπάρχει υλικό και που κενός χώρος. Το Siemens NX διαθέτει ισχυρά και προηγμένα εργαλεία CAD. Οι σχεδιαστές επωφελούνται από την παραμετρική μοντελοποίηση, επιτρέποντας την εύκολη τροποποίηση και ενημέρωση των σχεδίων. Το λογισμικό υποστηρίζει τόσο 2D όσο και 3D μοντελοποίηση, επιτρέποντας τη δημιουργία περίπλοκων και λεπτομερών μοντέλων.

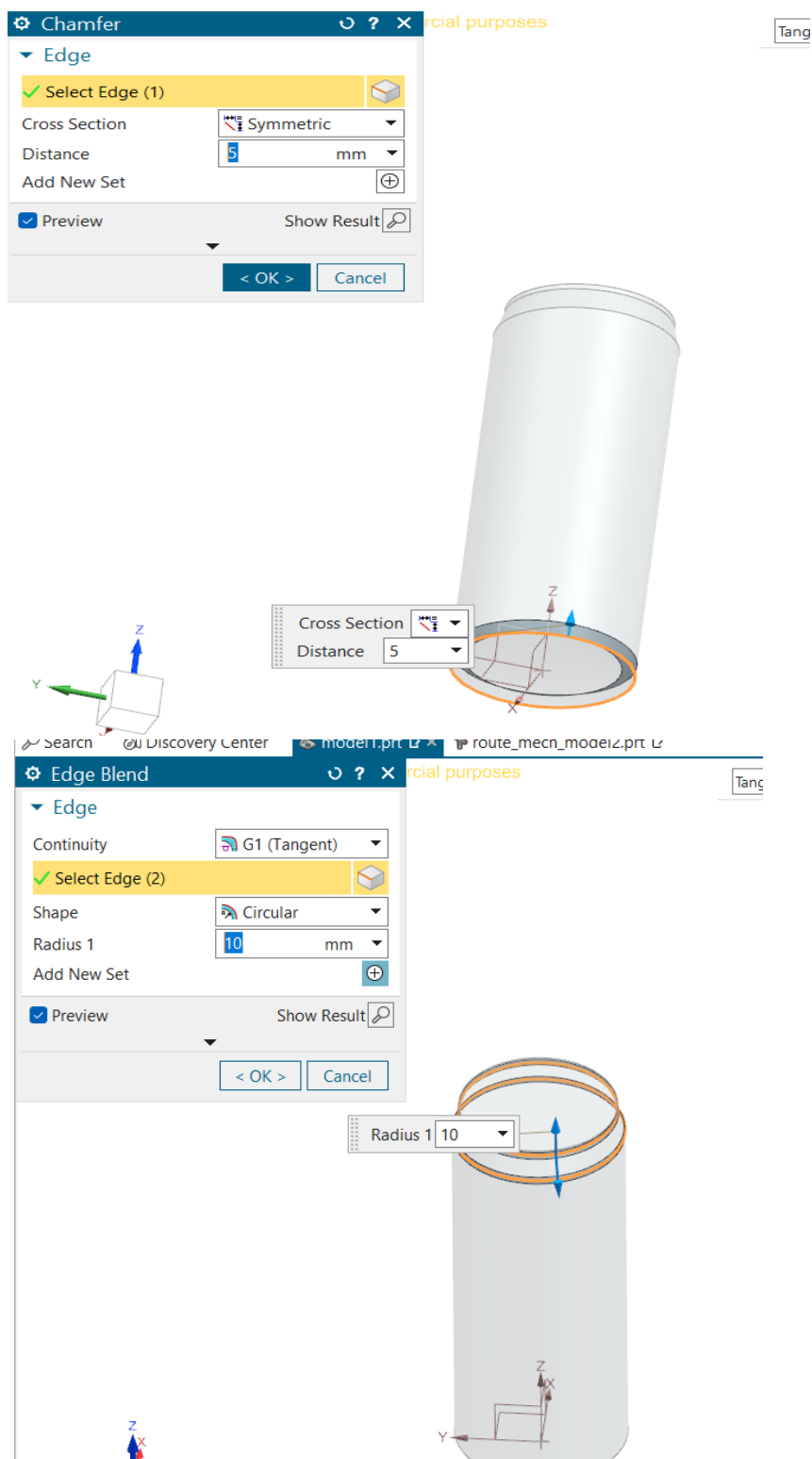
4.1 Σχεδιασμός μοντέλου

Ο σχεδιασμός του δοκιμίου έγινε στο περιβάλλον του SIEMENS NX , καθώς το Comsol Multiphysics παρέχει την δυνατότητα εισαγωγής 3D μοντέλου από CAD λογισμικά. Με βάση στοιχείων που έχει εκδώσει η εταιρία της COCA-COLA (γεωμετρία, διαστάσεις) αλλά και ανάλυσης στο εργαστήριο μικροκοπής, σχεδιάζεται το τρισδιάστατο σχέδιο. Παρακάτω ακολουθεί βηματικά η σχεδίαση του στο SIEMENS NX [1].

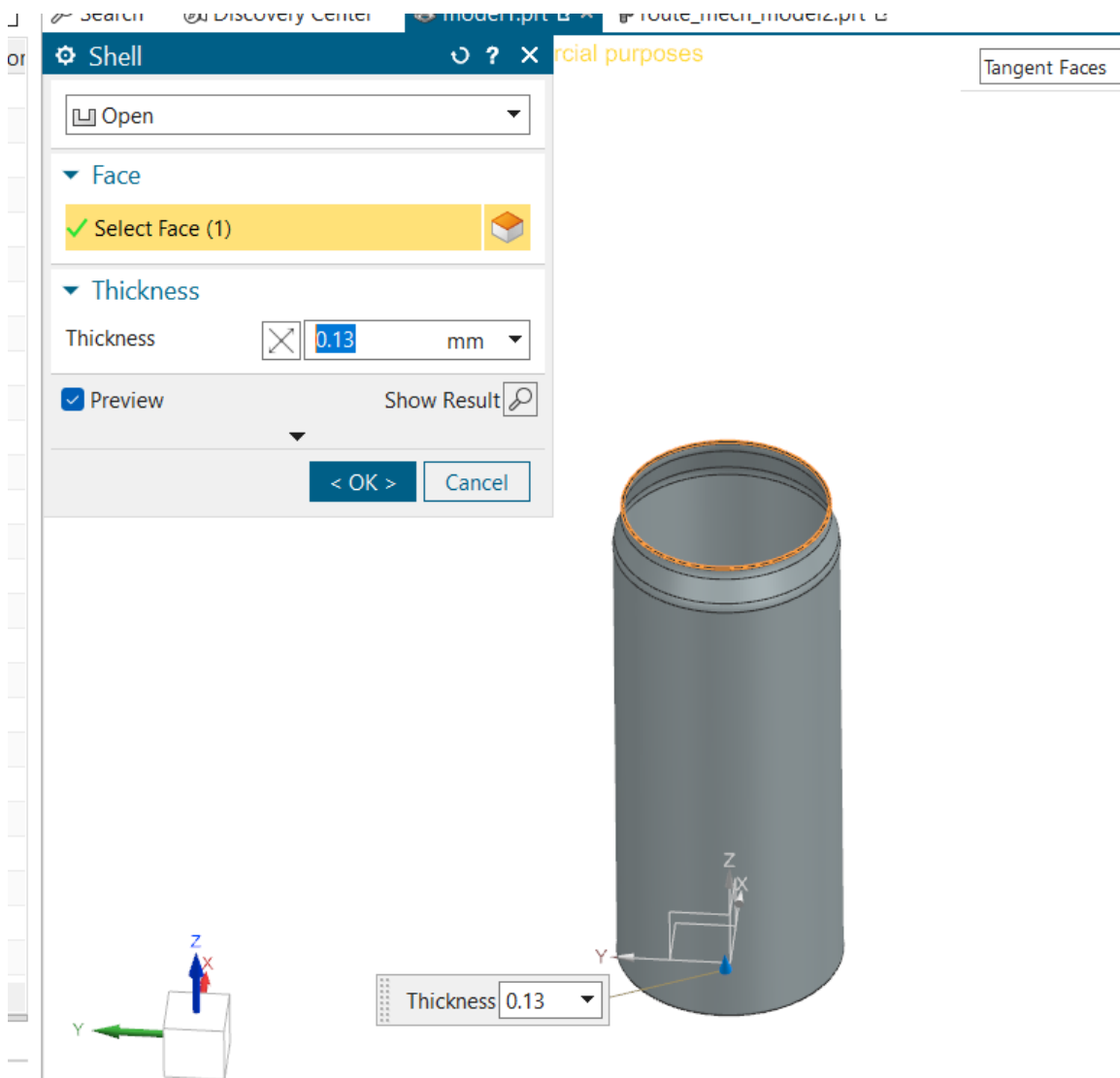
1ο βήμα Αρχικά σχεδιάζεται (sketch) το περίγραμμα του κουτιού με τις κατάλληλες διαστάσεις, και ύστερα με την εντολή Revolve περιστρέφουμε γύρω από τον z άξονα ,για την δημιουργία του επιθυμητού αποτελέσματος.



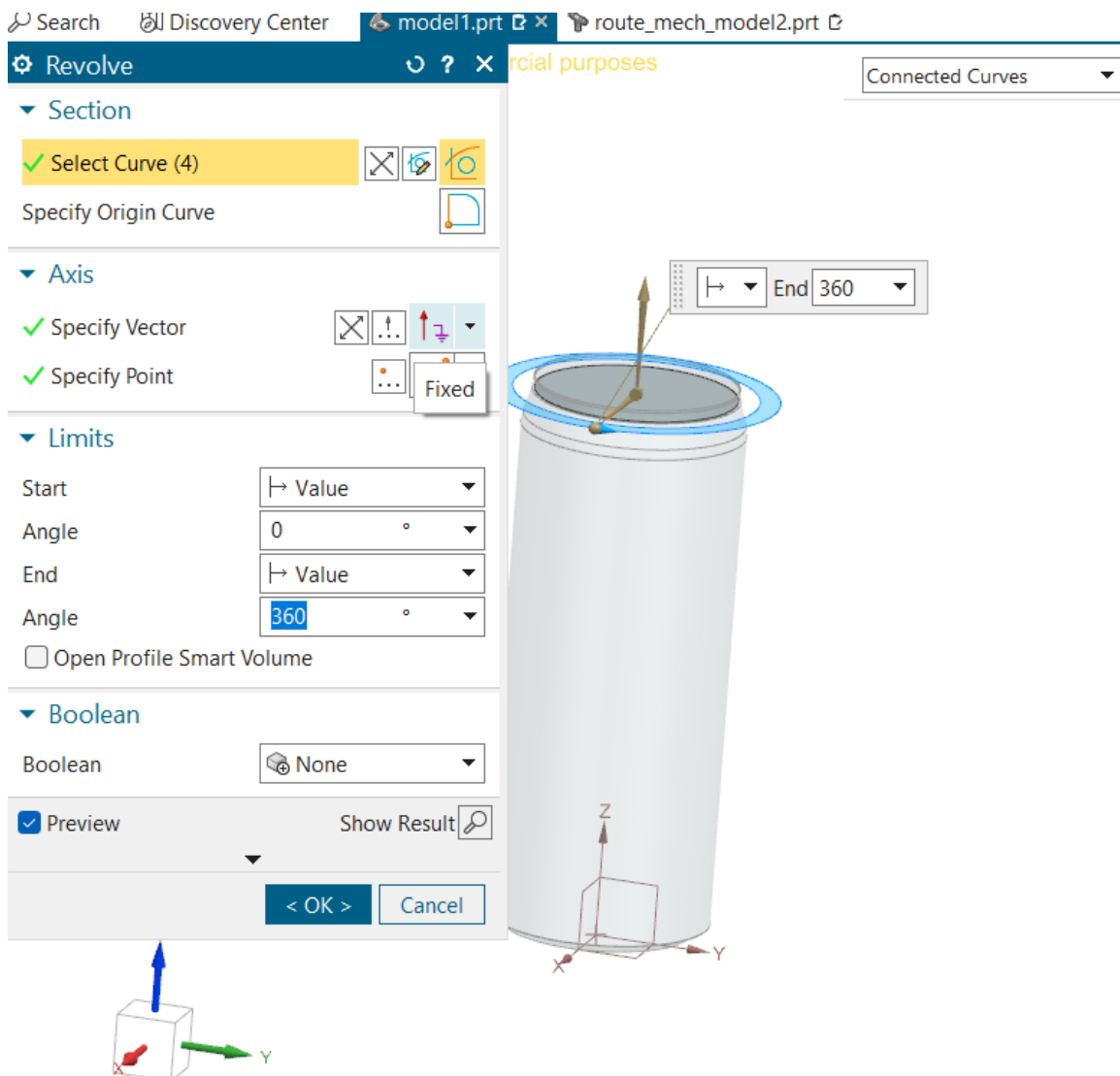
2^ο βήμα : Με τις εντολές Chamfer, Edge Blend “ κόβουμε “ το δοκίμιο στην βάση και κορυφή του .



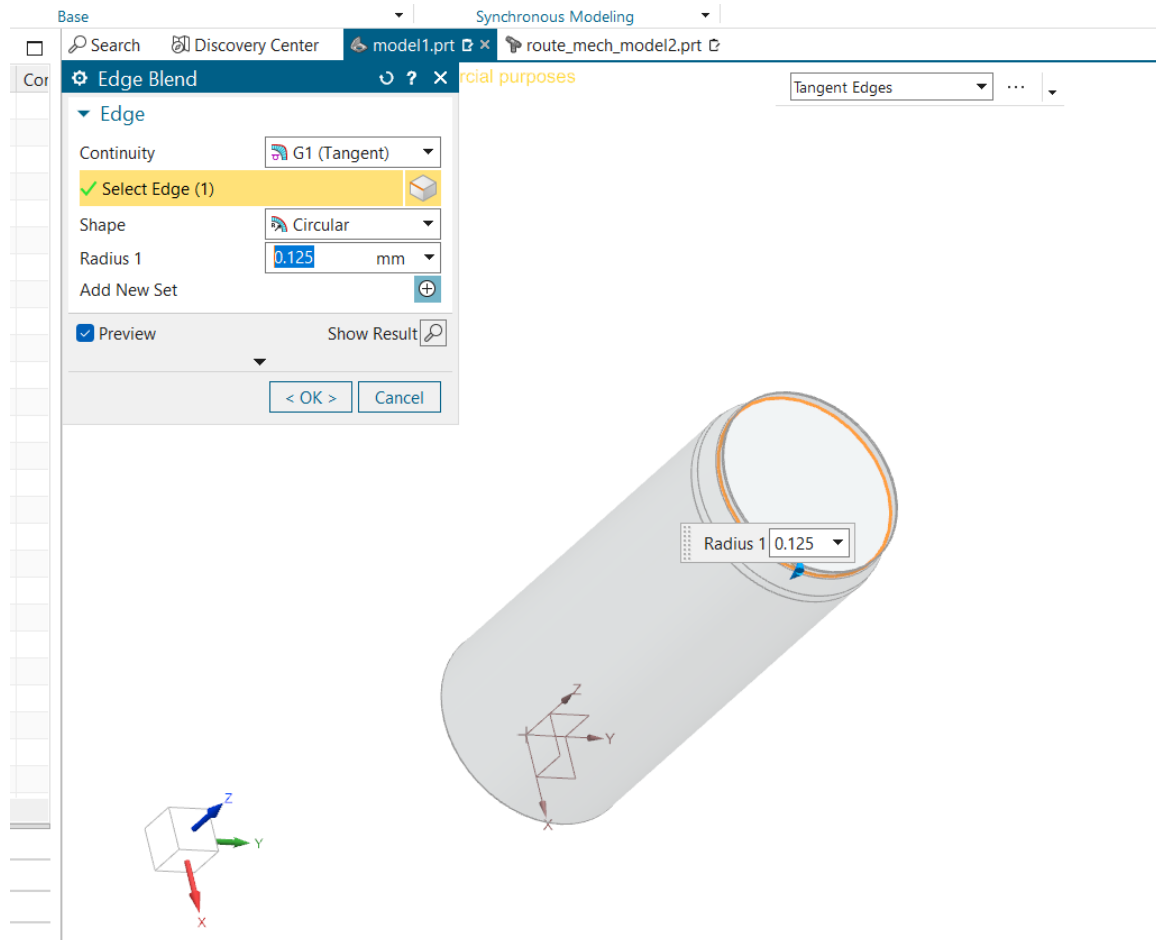
3^ο βήμα με την εντολή Shell αδειάζουμε το κουτί ενώ παράλληλα εφαρμόζουμε το κατάλληλο πάχος.



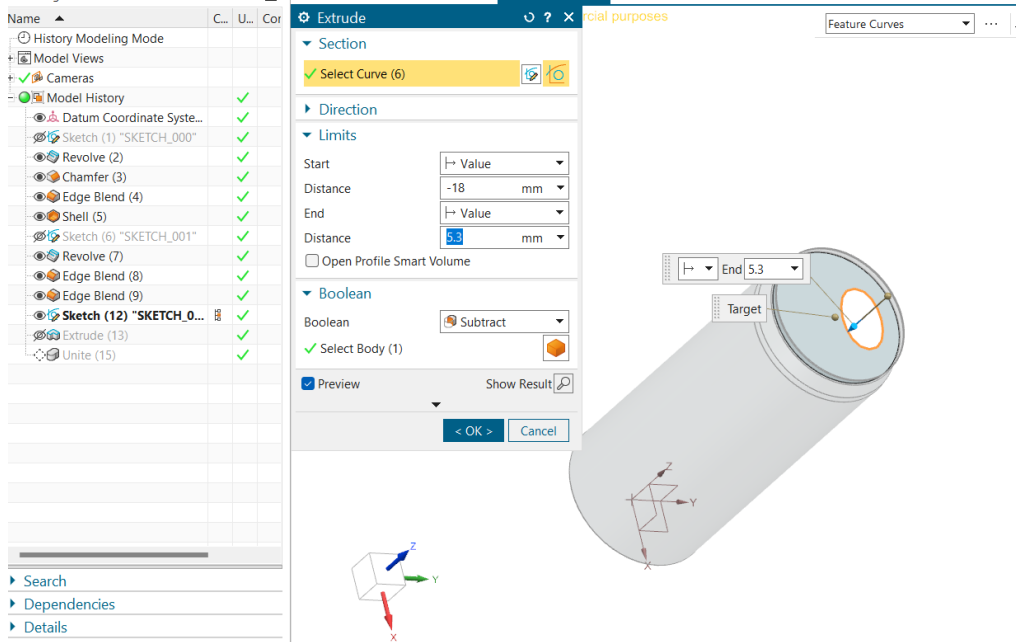
4^ο βήμα Τώρα με την εντολή sketch και revolve θα σχεδιάσουμε την κορυφή του κουτιού.



5^ο βήμα : Με τις εντολές , Edge Blend “ κόβουμε “ το δοκίμιο.



6^ο βήμα : Σχεδιάζουμε και κόβουμε το κενό που υπάρχει στην κορυφή του κουτιού και με την εντολή Unite ενώνουμε την κορυφή με το υπόλοιπο σώμα.



5. Comsol Multiphysics

Το COMSOL Multiphysics είναι ένα σημαντικό και ευέλικτο λογισμικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση και προσομοίωση φυσικών φαινομένων σε ένα ευρύ φάσμα κλάδων, όπως η μηχανική, η φυσική, η χημεία και η βιολογία. Το πρόγραμμα βασίζεται στην μέθοδο ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων φυσικής αλλά και πολυφυσικής(Multiphysics) , όπου πολλαπλά φυσικά φαινόμενα αλληλοεπιδρούν ταυτόχρονα.

Με το COMSOL Multiphysics ,ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει εικονικά μοντέλα από τον πραγματικό κόσμο σε ένα σύγχρονο ψηφιακό περιβάλλον τρισδιάστατης σχεδίασης, να αναλύσει την συμπεριφορά τους ενώ βρίσκονται υπό διάφορες συνθήκες και να βελτιστοποιήσει την απόδοση τους χωρίς την ανάγκη χρονοβόρων και κοστοβόρων φυσικών πρωτοτύπων. Το λογισμικό παρέχει στον χρήστη μια εύρη γκάμα από εργαλεία που χρησιμεύουν στην ακριβή σχεδίαση της γεωμετρίας του μοντέλου, βιβλιοθήκη υλικών με τις φυσικές ιδιότητες κάθε υλικού ήδη συμπληρωμένες από το σύστημα (μέτρο ελαστικότητας, λόγος Poisson, αντοχή διαρροής αντοχή στον εφελκυσμό κ.α.). Την δυνατότητα ρύθμισης πολλαπλών προσομοιώσεων φυσικών φαινομένων και τέλος την οπτικοποίηση και ανάλυση των αποτελεσμάτων.

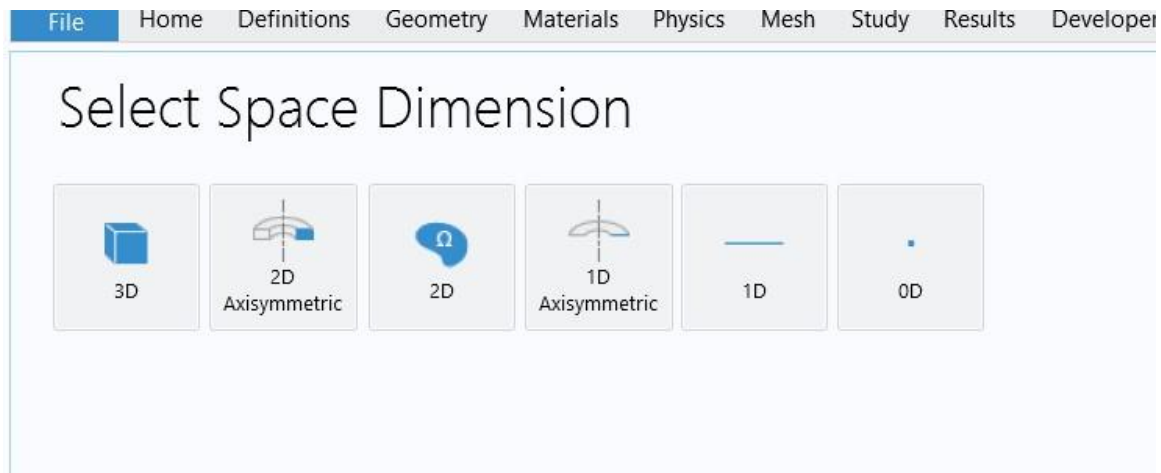
Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του COMSOL Multiphysics είναι η ικανότητα του να χειρίζεται σύνθετα φυσικά φαινόμενα , όπου διαφορετικές φυσικές διεργασίες αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Για παράδειγμα, οι μηχανικοί μπορούν να προσομοιώσουν την αλληλεπίδραση μεταξύ της δομικής μηχανικής και της μεταφοράς θερμότητας σε ένα θερμοδυναμικό σύστημα ή όπως γίνεται και στην παρούσα διπλωματική την αλληλεπίδραση μεταξύ της δομικής μηχανικής και της ακουστικής για την εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών.

Το COMSOL Multiphysics διαθέτει ένα ευρύ φάσμα από φυσικά φαινόμενα όπως της δομικής μηχανικής, την μεταφορά θερμότητας, της ροής ρευστών ,της ηλεκτρομαγνητικής ,της ακουστικής ,των χημικών αντιδράσεων αλλά και της ανίχνευσης σωματιδίων.

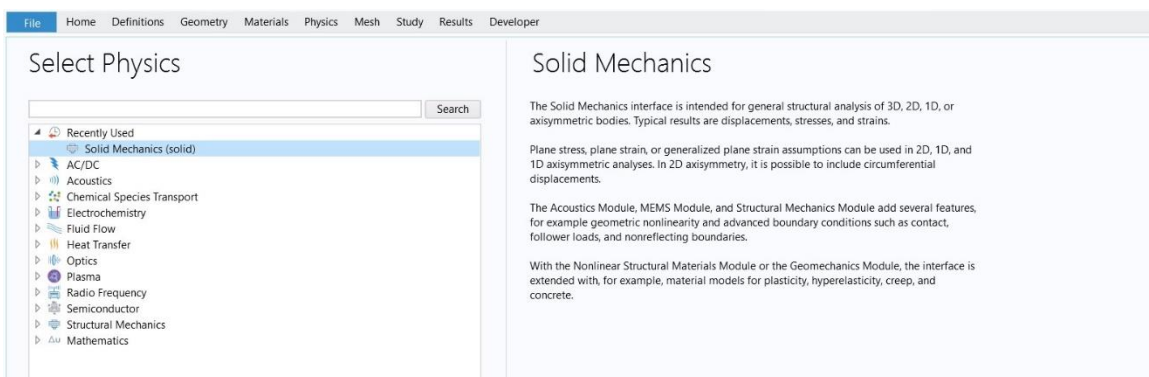
Στον τομέα της σχεδίασης το COMSOL Multiphysics παρέχει ένα σύγχρονο περιβάλλον σχεδίασης με διαδραστικά εργαλεία αλλά και συμβουλευτικά βίντεο για τον τρόπο χρήσης τους, ενώ διαθέτει και την ικανότητα εισαγωγής(import) από “ξένα “ προγράμματα τρισδιάστατης σχεδίασης (Solidworks,NX Siemens, AutoCad κ.α.)

5.1 Αρχικές ρυθμίσεις

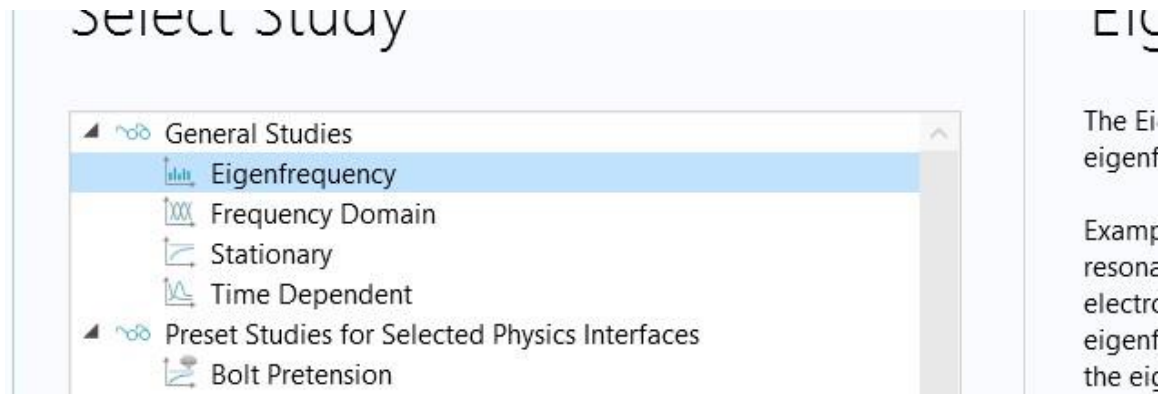
Αρχικά εφαρμόζουμε τις κατάλληλες ρυθμίσεις έτσι ώστε να γίνει σωστή περιγραφή του πειράματος στο λογισμικό. Έτσι δηλώνουμε ότι θα μελετήσουμε στις 3 διαστάσεις (3D)(σχήμα 5.1) , έπειτα η ανάλυση που θα γίνει θα είναι στερεή μηχανική (solid mechanics) ενώ θα μελετήσουμε για την ιδιοσυχνότητα.



Εικόνα 6. 1 επιλογή των διαστάσεων



Εικόνα 6. 2 Επιλογή του τύπου ανάλυσης



Εικόνα 6. 3Επιλογή του τύπου μελέτης

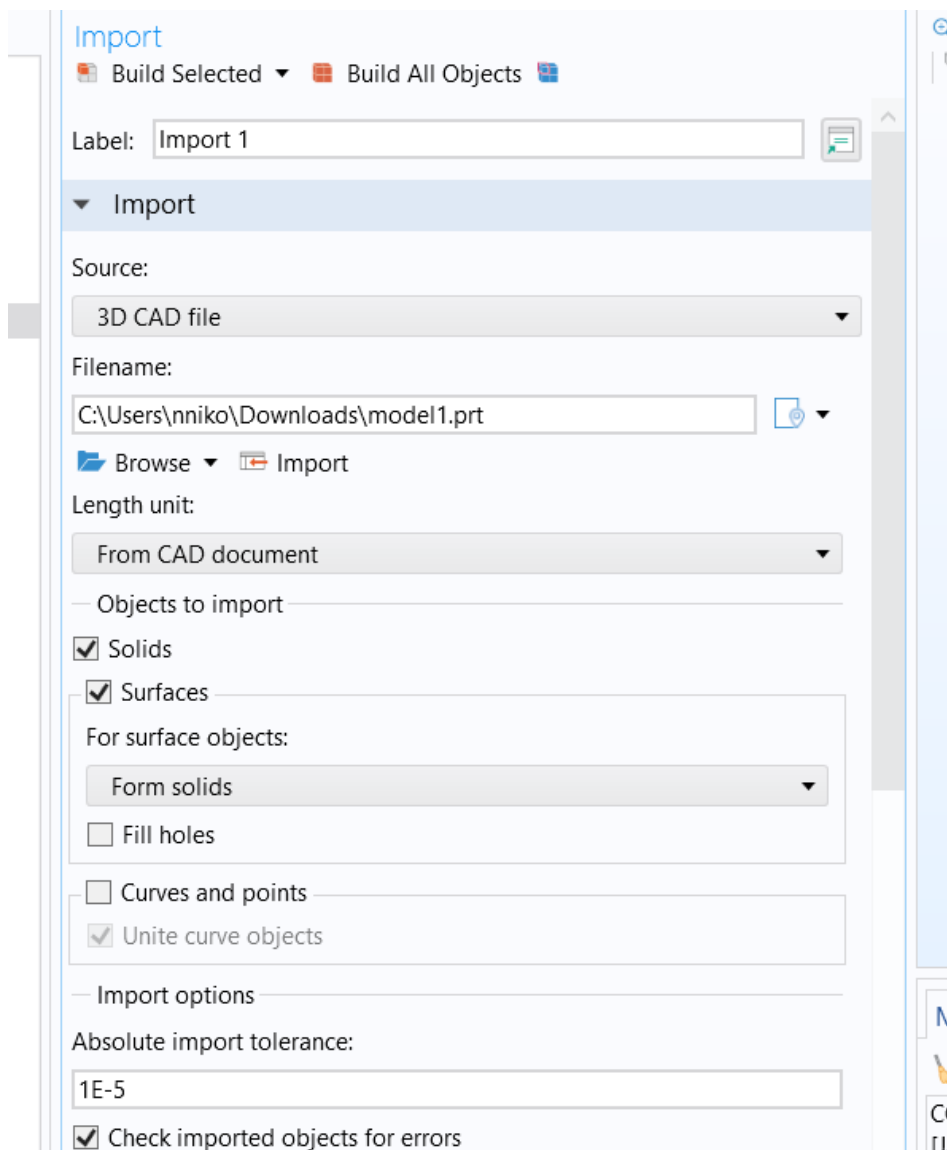
Εισαγωγή του μοντέλου από το NX Siemens στο Comsol Multiphysics

Στην επιλογή του δέντρου (geometry) καθορίζεται η γεωμετρία του επιλεγόμενου μοντέλου που πρόκειται να μοντελοποιηθεί, επιλέγοντας την εντολή εισαγωγή (import) εμφανίζονται διάφορες διαθέσιμες καρτέλες όπου τοποθετούμε τις κατάλληλες ρυθμίσεις για την επιτυχή εισαγωγή του μοντέλου (Σχήματα 5.4,5.5):

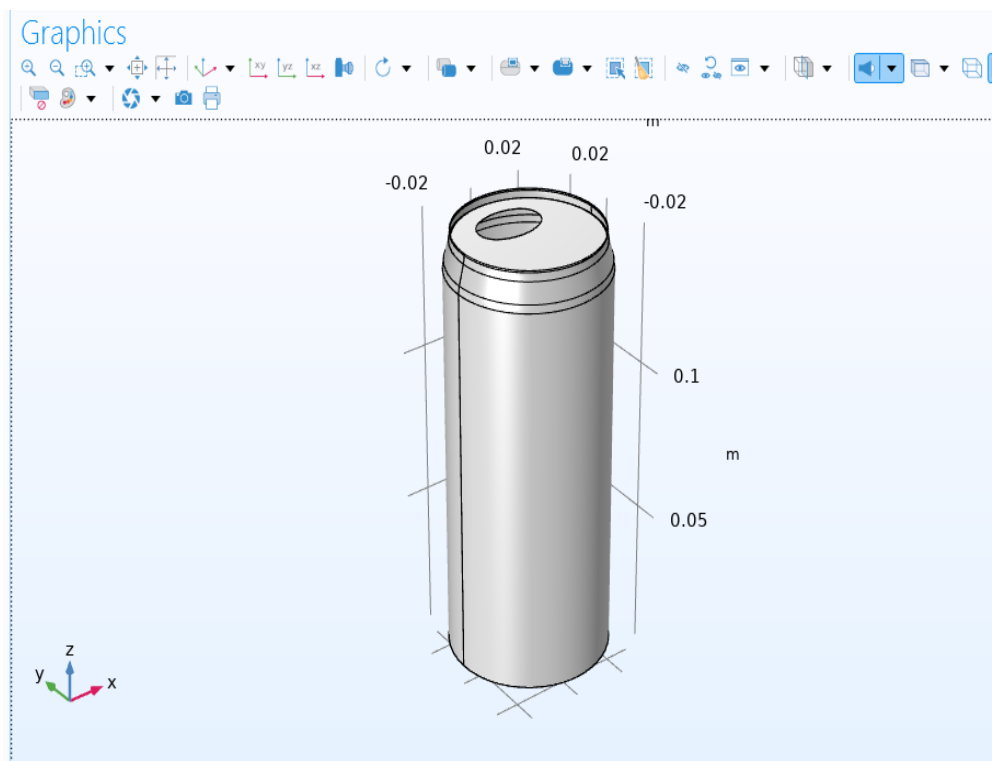
- Τύπος αρχείου που πρόκειται να εισαχθεί
- Το όνομα του αρχείου (Filename)
- Την προέλευση των μονάδων που θα χρησιμοποιήσει το Comsol για να καθορίσει την γεωμετρία του μοντέλου.
- Τι είδους γεωμετρίες θα κάνει εισαγωγή.

Στις παραπάνω ρυθμίσεις επιλέχθηκαν αντίστοιχα :

- (3D CAD file) καθώς το πρόγραμμα σχεδιάστηκε σε πρόγραμμα τρισδιάστατης σχεδίασης το NX Siemens
- (From CAD Document) διότι σε αυτό το περιβάλλον σχεδιάστηκε και ορίστηκαν οι κατάλληλες μονάδες.
- (solids and objects)επιλέχθηκαν να μεταφερθούν στερεά και επιφάνειες καθώς πρόκειται για την πιο αναλυτική μοντελοποίηση του αρχείου .



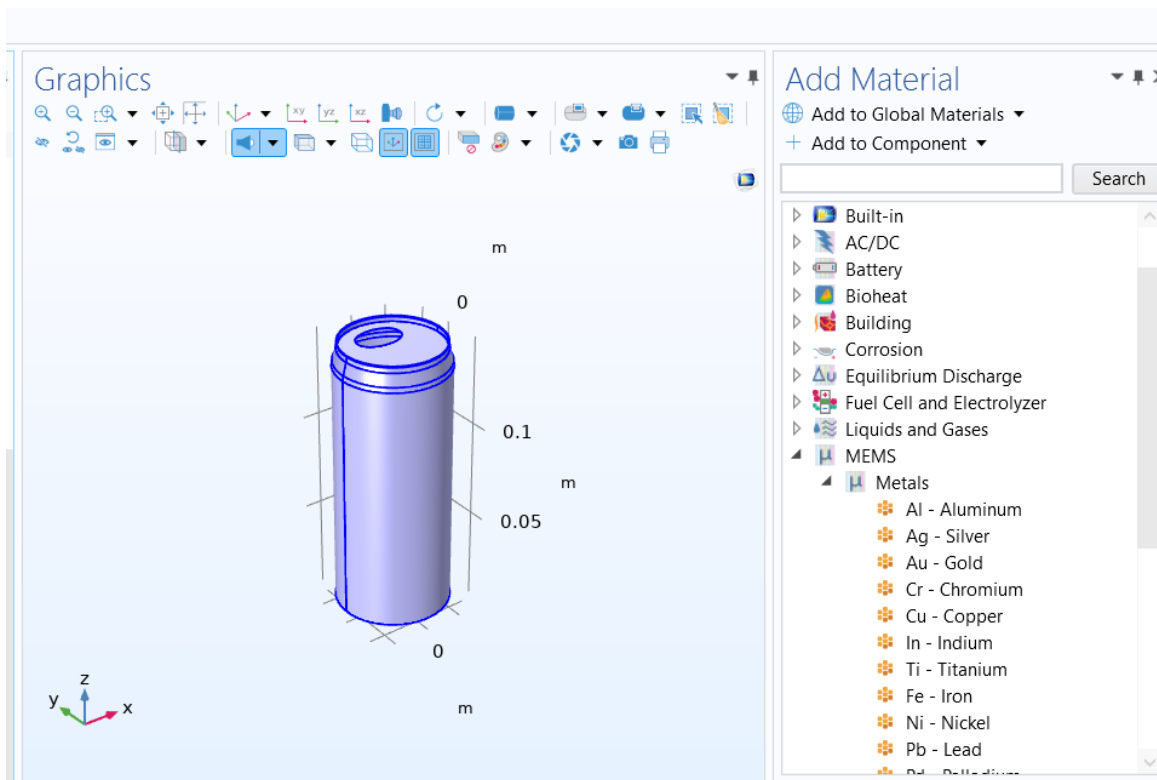
Εικόνα 6. 4 Εισαγωγή Μοντέλου από το NX Siemens



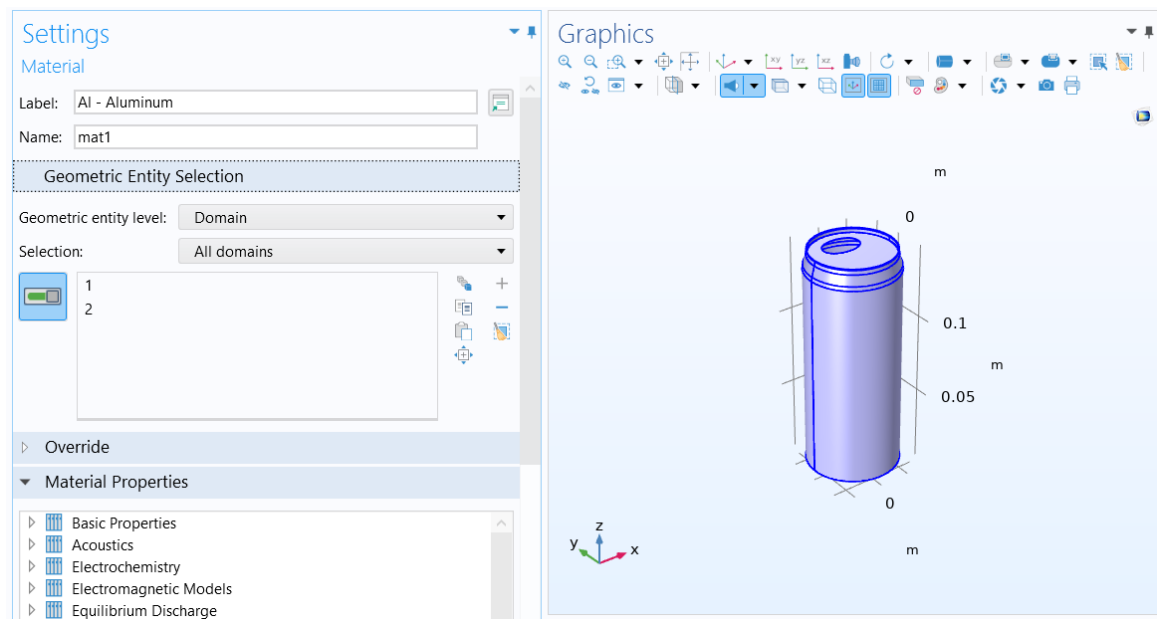
Εικόνα 6.5 Εισαγωγή Μοντέλου από το NX Siemens

5.2 Εισαγωγή του υλικού στο μοντέλο.

Στην επιλογή του δέντρου (materials) επιλέγεται το επιθυμητό υλικό από την βιβλιοθήκη του Comsol Multiphysics. Επιλέγουμε την καρτέλα MEMS και στην συνέχεια Metals και Aluminium (Σχήμα 5.6). Το Comsol παρέχει αυτόματα τις βασικές ιδιότητες του αλουμινίου που θα χρειαστούν για την κατάλληλη διακριτοποίηση, δηλαδή το μέτρο ελαστικότητας (Young's Modulus) την πυκνότητα του υλικού (density) και ο λόγος Poisson. Δίδοντας τις κατάλληλες επιλογές στην καρτέλα Geometric Entity Selection ,επιτυγχάνουμε την επιτυχή εισαγωγή του υλικού. Δηλαδή επιλέγουμε η προσθήκη του υλικού να γίνει και στα δυο πεδία (domain,all domains)(Σχήμα 5.7).



Εικόνα 6. 6 Εισαγωγή υλικού στο μοντέλο



Εικόνα 6. 7 Εισαγωγή υλικού στο μοντέλο

5.3 Διακριτοποίηση (meshing) του μοντέλου

Στην επιλογή του δέντρου (mesh) εισάγονται παράμετροι όπως το μέγεθος ή πυκνότητα (density) της διακριτοποίησης, το σχήμα των πεπερασμένων στοιχείων αλλά και οι επιφάνειες του μοντέλου προς διακριτοποίηση.

Στην επιλογή (Element size) επιλέγεται (normal) καθώς μια τέτοια πυκνότητα διακριτοποίησης επαρκεί για σωστή ανάλυση αλλά και ελαχιστοποίηση του χρόνου υπολογισμού (Σχήμα 5.7).

Settings

Size

☐ Build Selected ☐ Build All

Label:

Element Size

Calibrate for:

☒ Predefined

☐ Custom

Element Size Parameters

Maximum element size:

mm

Minimum element size:

mm

Maximum element growth rate:

Curvature factor:

Resolution of narrow regions:

Εικόνα 6. 8 Πυκνότητα και Μέγεθος Πεπερασμένων στοιχείων

Ενώ επιλεγούμε το σχήμα των ελεύθερων τετράεδρων(Free Tetrahedral) για το σχήμα των πεπερασμένων στοιχείων(Σχήμα 5.8).

Settings

Free Tetrahedral

Build Selected
 Build All

Label:

▼ Domain Selection

Geometric entity level: Remaining

▼ Scale Geometry

x-direction scale:

y-direction scale:

z-direction scale:

▸ Control Entities

▸ Tessellation

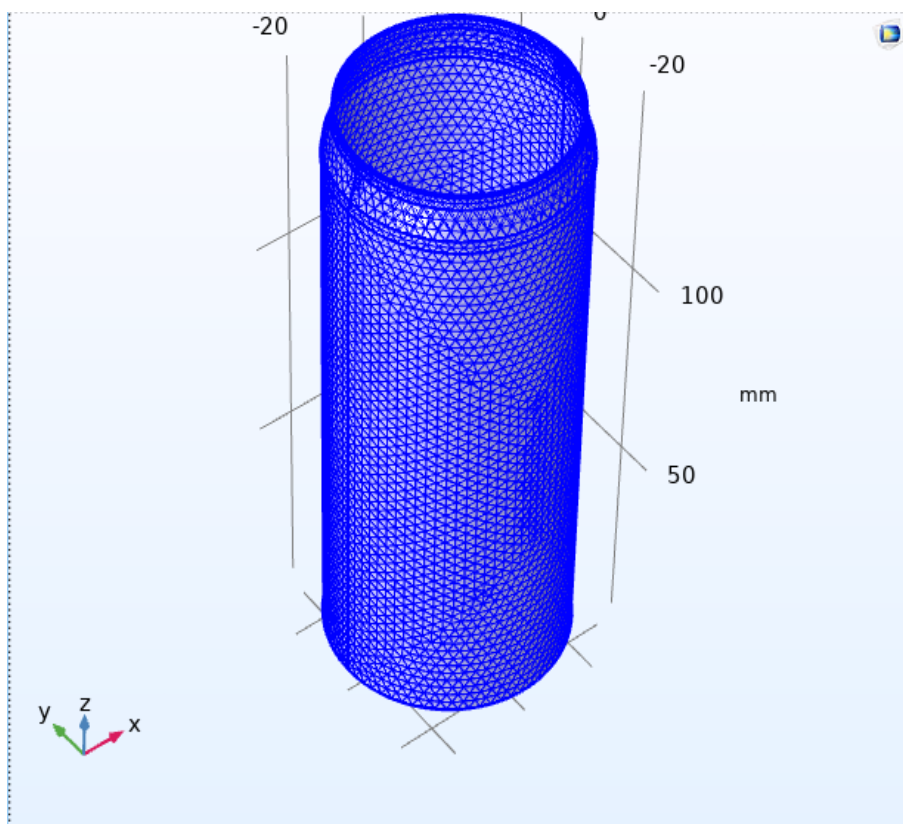
▸ Element Quality Optimization

▼ Information

Last build time: 3 seconds

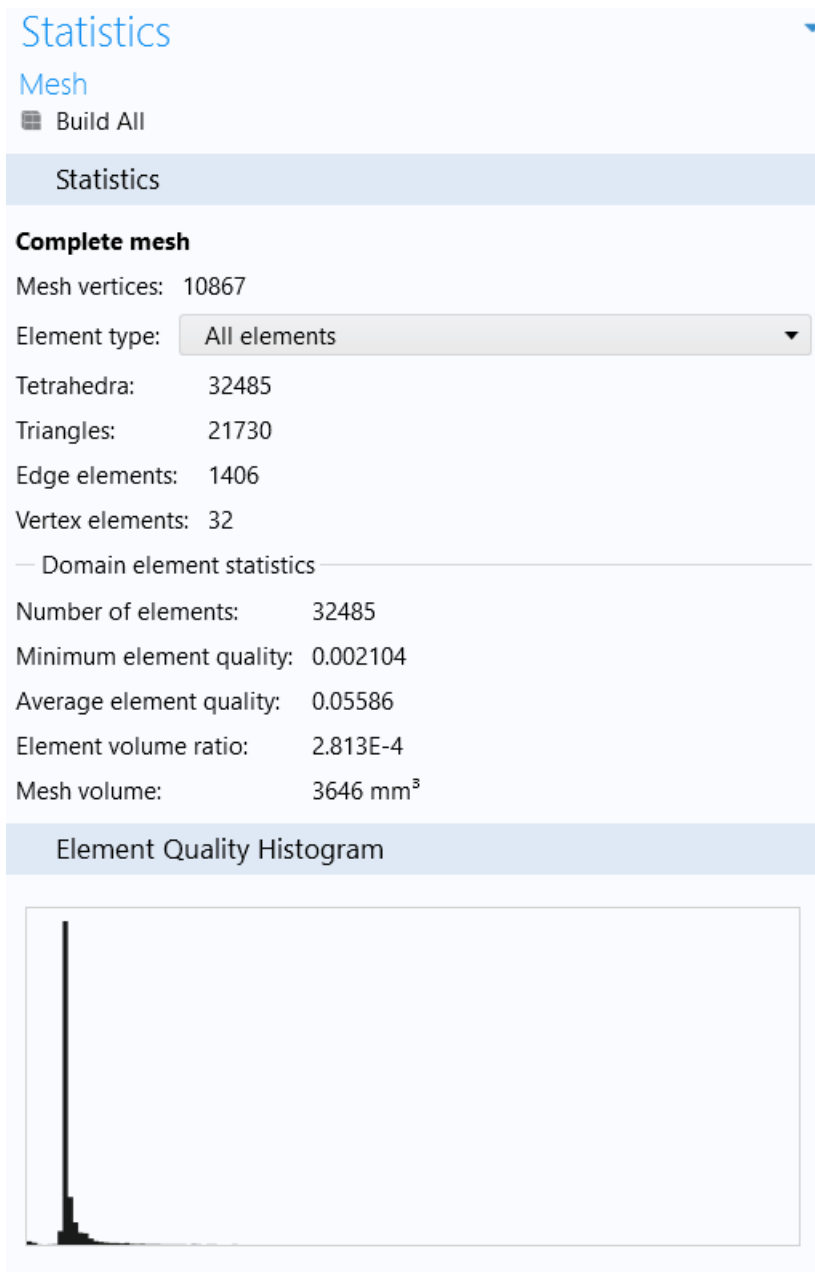
Built with: COMSOL 6.1.0.282 (win64), Feb 1, 2024, 7:03:37 PM

Εικόνα 6. 9 Γεωμετρία Πεπερασμένων στοιχείων



Εικόνα 6.10 Γεωμετρία Πεπερασμένων στοιχείων

Τέλος το Comsol Multiphysics μπορεί να μας παρέχει και κάποια επιπλέον στατιστικά για την διακριτοποίηση μέσω της επιλογής (statistics)



Εικόνα 6. 10 Στατιστικά δεδομένα Πεπερασμένων Στοιχείων

5.4 Επίλυση του προβλήματος

Στην επιλογή της καρτέλας (study), επιλέγεται ο τύπος ανάλυσης που είχε καθοριστεί στην αρχή της ερευνάς μας, δηλαδή αυτός της ιδιοσυχνότητας(eigenfrequency). Επιλεγούμε να μελετήσουμε τις πρώτες έξι

ιδιοσυχνότητες καθώς το μοντέλο ακολουθεί μια φθίνουσα ταλάντωση και θα είναι πιο δύσκολο να ταυτιστούν υπολογιστικά οι δευτερεύουσες ταλαντώσεις με τα πειραματικά μας δεδομένα. Έπειτα επιλέγουμε την εντολή (Compute) και το λογισμικό επιλύει το πρόβλημα μας (Σχήμα 5.10).

The screenshot shows the 'Settings' dialog for an 'Eigenfrequency' study. The 'Study Settings' section includes options for the solver (ARPACK), search method (Manual), number of frequencies (6), unit (Hz), search range (1[Hz]), and search method around shift (Closest in absolute). The 'Physics and Variables Selection' section shows 'Solid Mechanics (solid)' selected. The 'Values of Dependent Variables' section is expanded, showing 'Mesh Selection' and 'Adaptation and Error Estimates'.

Settings
Eigenfrequency
= Compute ↻ Update Solution

Label: Eigenfrequency

Study Settings

Eigenfrequency solver: ARPACK

Eigenfrequency search method: Manual

Desired number of eigenfrequencies: ☐ 6

Unit: Hz

Search for eigenfrequencies around: ☒ 1[Hz] Hz

Eigenfrequency search method around shift: Closest in absolute

Use real symmetric eigenvalue solver: Automatic

☐ Real symmetric eigenvalue solver consistency check

— Values of linearization point —

Settings: Physics controlled

☐ Include geometric nonlinearity

Physics and Variables Selection

☐ Modify model configuration for study step

»	Physics interface	Solve for	Equation form
<input checked="" type="radio"/>	Solid Mechanics (solid)	<input checked="" type="checkbox"/>	Automatic (Eigenfrequ...

▸ Values of Dependent Variables

▸ Mesh Selection

▸ Adaptation and Error Estimates

Εικόνα 6.11 Επίλυση του προβλήματος

Στην καρτέλα των μηνυμάτων εμφανίζονται πληροφορίες σχετικά με την επίλυση του προβλήματος όπως οι βαθμοί ελευθερίας που επιλύθηκαν (Degree of freedom solved) αλλά και ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος

[Feb 5, 2024, 12:13 PM] Opened file: C:\Users\nniko\Desktop\nikolidakis.mph
[Feb 5, 2024, 12:45 PM] Number of degrees of freedom solved for: 195249.
[Feb 5, 2024, 12:45 PM] Solution time (Study 1): 14 s.

Εικόνα 6.12 Στατιστικά επίλυσης του προβλήματος

5.5 Ανάλυση των αποτελεσμάτων

Όπως είχαμε αναφέρει στο πρώτο κεφάλαιο σκοπός της εργασίας είναι η υπολογιστική εύρεση ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών σε ένα μεταλλικό κουτί αλλά και η πειραματική επιβεβαίωση με την χρήση πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου. Για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων μελετήσαμε σε ένα εύρος συχνοτήτων 0-2000 Hz. Επιλέξαμε αυτό το εύρος γιατί οι δυνάμεις διέγερσης στη φύση διεγείρουν μόνο τις πρώτες ιδιοσυχνότητες της κατασκευής (χαμηλές) και δεύτερον επειδή οι αδρανειακές δυνάμεις έχουν μικρότερη επιρροή στη δυναμική του συστήματος όσο αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης.[11]

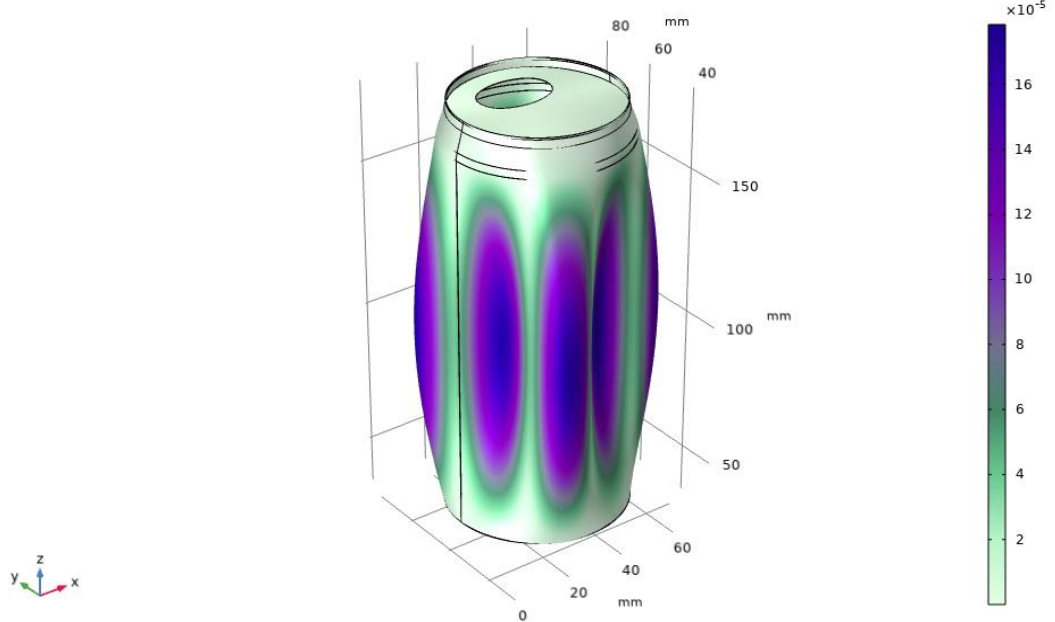
Ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων

Στην επιλογή του δέντρου (Results) επιλέγουμε την καρτέλα (mode shape) κι εμφανίζονται βαθμώτα οι ιδιοσυχνότητες και αντίστοιχα οι ιδιομορφές τους.

1^η Ιδιομορφή

Eigenfrequency=967.71 Hz

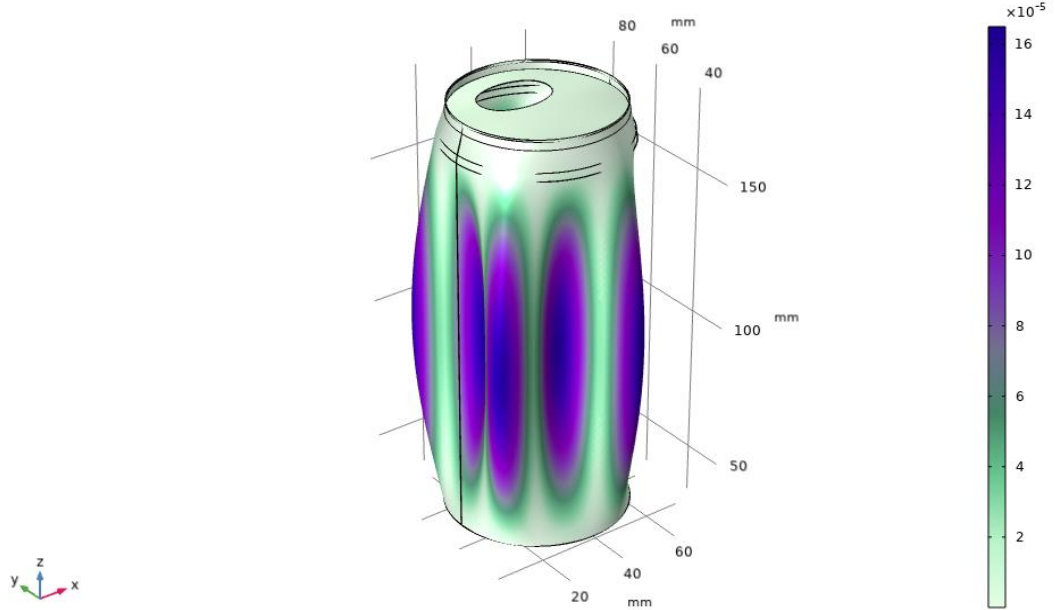
Surface: Displacement magnitude (mm)



2^η Ιδιομορφή

Eigenfrequency=1097.3 Hz

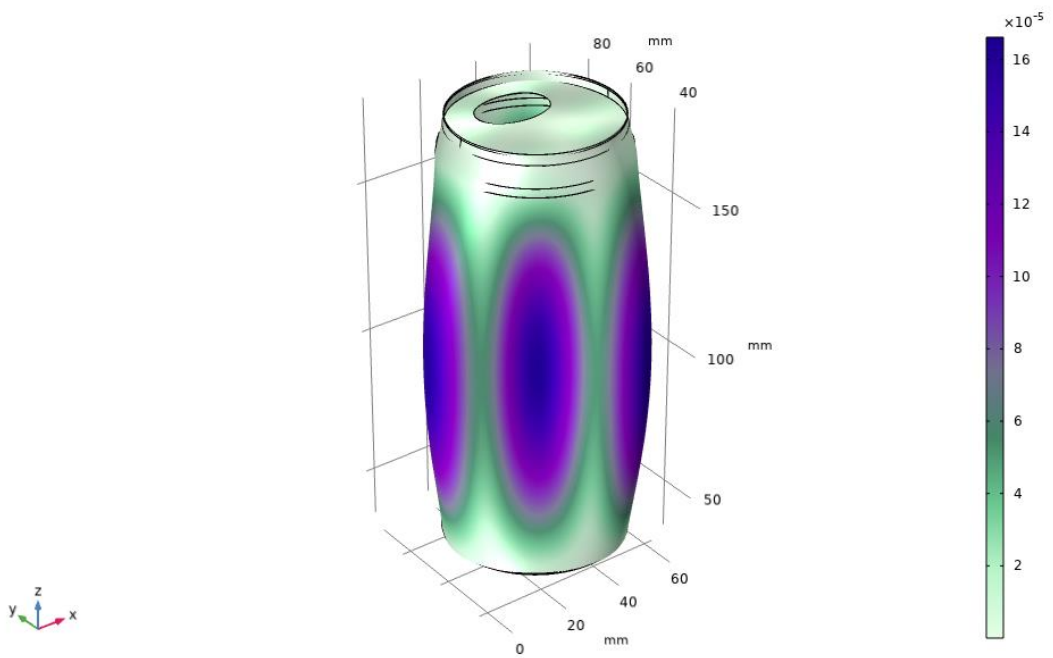
Surface: Displacement magnitude (mm)



3^η Ιδιομορφή

Eigenfrequency=1286 Hz

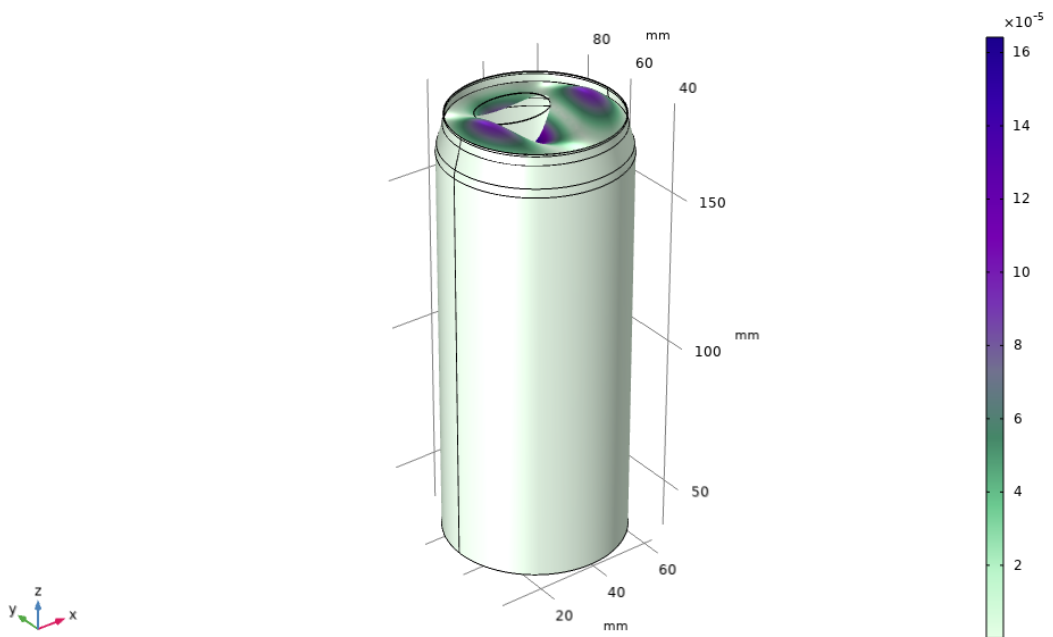
Surface: Displacement magnitude (mm)



4^η Ιδιομορφή

Eigenfrequency=1332.2 Hz

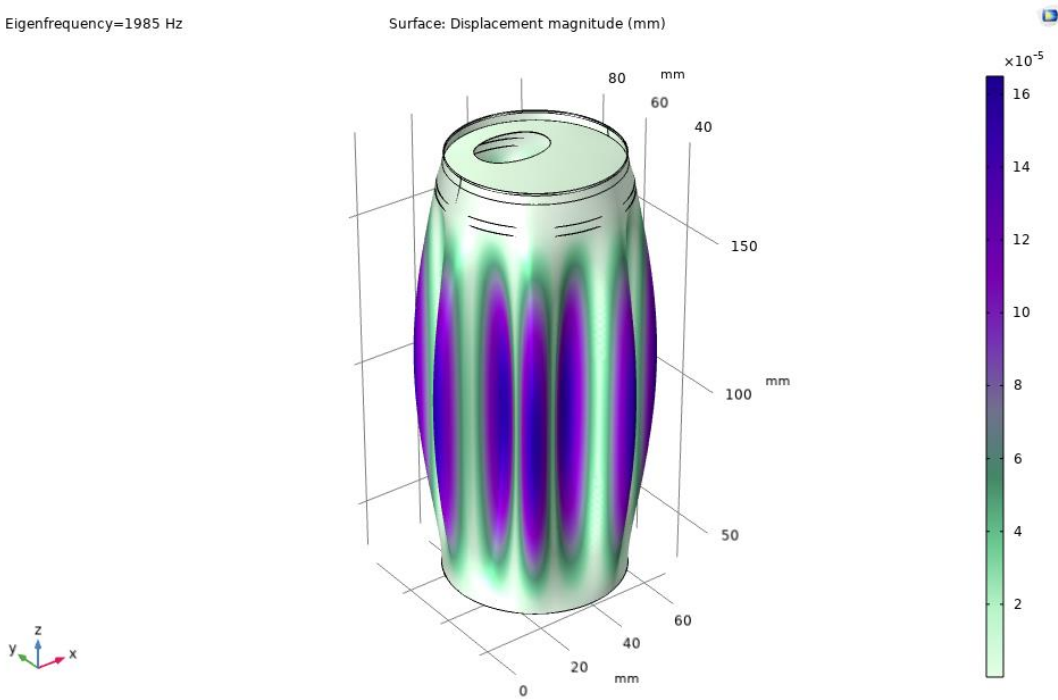
Surface: Displacement magnitude (mm)



5^η Ιδιομορφή

Eigenfrequency=1985 Hz

Surface: Displacement magnitude (mm)



6. Πειραματικό Σκέλος

6.1 Θεωρία του πειράματος

Αρχικά για να γίνει μια καλύτερη κατανόηση του πειράματος θα γίνει μια εκτενέστερη ανάλυση στο φαινόμενο του συντονισμού και των ιδιοσυχνοτήτων- φυσικών συχνοτήτων.

Η φυσική συχνότητα είναι η τιμή της συχνότητας η οποία ένα σύστημα τείνει να δονηθεί απουσία εξωτερικής δύναμης ή δύναμη απόσβεσης . Οι φυσικές συχνότητες είναι μοναδικά χαρακτηριστικά του κάθε υλικού. Αντικείμενα από διαφορετικά υλικά τείνουν να ταλαντώνονται σε αυτές τις συχνότητες με ένα μοτίβο κίνησης που ορίζεται ως κανονικός τρόπος λειτουργίας [9]. Οι δονήσεις του αντικειμένου εξαρτώνται από την μάζα και την δυσκαμψία του αντικειμένου.Γενικά οι βαρύτερες δομές αναμένεται να έχουν λιγότερες φυσικές συχνότητες από ότι οι ελαφρύτερες δομές.[10]

Έτσι κάθε αντικείμενο βάση της γεωμετρίας του , το υλικό που είναι φτιαγμένο αλλά και τις συνοριακές συνθήκες τις οποίες του εφαρμόζουμε, εξάγει ένα αριθμό ιδιοσυχνοτήτων. Αυτές οι ιδιοσυχνότητες μπορεί διαφέρουν ελάχιστα ανάλογα με τον τρόπο που προσπαθήσαμε να τις μελετήσουμε. Δηλαδή με απλό μικρόφωνο ή πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, ακόμα και την θέση που τοποθετούμε το μικρόφωνο ή τον κρύσταλλο καθώς είναι μια πολύ ευαίσθητη μέτρηση. Εάν όμως συλλέξουμε πληροφορίες από όλες τις μετρήσεις και τις συγκρίνουμε μπορούμε να διακρίνουμε ότι προσεγγιστικά ταιριάζουν.[20]

6.2 Περιγραφή του πειράματος

Στις πρώτες προσπάθειες που κάναμε για τον υπολογισμό των ιδιοσυχνοτήτων, συμπεράναμε ότι το πείραμα μας χρίζει ενός πολύ ευαίσθητου πειράματος του οποίου οι μεταβλητές είναι πάρα πολλές και θα πρέπει να είμαστε προσεκτικοί για την σωστή έκδοση των πειραματικών ιδιοσυχνοτήτων.

Αρχικά συνειδητοποιήσαμε ότι υπάρχουν διάφορες γεωμετρικές αστοχίες μεταξύ των εμπορικών κουτιών της Coca-Cola οι οποίες επηρεάζουν τις ιδιοσυχνότητες από κουτί σε κουτί έτσι για την σωστή έκδοση των αποτελεσμάτων αποφασίσαμε να πειραματιστούμε πάνω σε τρία κουτάκια και να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα, έτσι όσο το δυνατόν περισσότερο να ελαχιστοποιήσουμε την πιθανότητα σφάλματος. Για την διευκόλυνση των μετρήσεων μας αριθμήσαμε τα κουτιά (1,2,3)



Εικόνα 1.2.1 Αρίθμηση κουτιών

Έπειτα, από δοκιμές που κάναμε συνειδητοποιήσαμε ότι σημείο τοποθέτησης του κρυστάλλου παίζει καθοριστικό ρόλο στην έκδοση των σωστών αποτελεσμάτων, οπότε τοποθετήσαμε τον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο στις θέσεις (M1,M2) οπου η απόδοση τους παρουσιάζει τα πιο ευκρινή αποτελέσματα.



Εικόνα 6.2.2 Σημεία τοποθέτησης πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου (M1-M2)



Εικόνα 6.2.3 Τοποθέτηση του κρυστάλλου στην θέση M1



Εικόνα 6.2.4 Τοποθέτηση του κρυστάλλου στην θέση M2

Στην συνέχεια του πειράματος μας και μετά από κάποιες πρόχειρες δοκιμές συμπεράναμε ότι εκτός από την γεωμετρία του υλικού που επηρεάζει τις ιδιοσυχνότητες αλλά και το σημείο που τοποθετείται ο κρύσταλλος (M1,M2), πρέπει να ελέγξουμε και να συγκρίνουμε ανά κουτί την τοποθεσία που χτυπάει ο διεγέρτης καθώς είναι ένας σημαντικός παράγοντας του πειράματος.

Θεωρούμε ότι το φορτίο που ασκείται στο κουτάκι από τον ταλαντωτή είναι πάντα ίδιο, και προσπαθήσαμε να το κάνουμε με τέτοιο τρόπο καθώς δεν διαθέταμε τα τεχνολογικά μέσα για την επανειλημμένη ισόποση κατανομή φορτίου στο κουτί. Έτσι μετά από δοκιμές που κάναμε και συγκεκριμένα στον πάτο του κουτιού, στο κάτω μέρος, στην μέση, στα τρία τέταρτα του κουτιού αλλά και στην κορυφή βρήκαμε ότι τα πιο ευκρινή αποτελέσματα βγαίνουν στην μέση και στα τρία τέταρτα του κουτιού. Το πρώτο σημείο κρούσης (Source 1) παρατηρήσαμε ότι έχει την μέγιστη απόδοση όταν τοποθετηθεί αντιδιαμετρικά από το πρώτο σημείο τοποθέτησης του κρυστάλλου (Measurement 1) οπότε το τοποθετήσαμε εκεί , ενώ για να καλύψουμε τα περισσότερα ενδεχόμενα τοποθετήσαμε το δεύτερο σημείο κρούσης (Source2) στα τρία τέταρτα του κουτιού και πιο κοντά στο δεύτερο σημείο τοποθέτησης του κρυστάλλου (Measurement 2)



Εικόνα 6.2.5 Σημεία κρούσης Ταλαντωτή (S1-S2)

Ακόμη παρατηρήσαμε ότι η μάζα του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου είναι υπολογίσιμη σε σχέση με την μάζα του άδειου κουτιού και αυτή η επιπλέον μάζα που θα είναι προσκολλημένη στο κουτί θα επηρεάσει στην ταλάντωση, άρα και στις ιδιοσυχνότητες. Για αυτό τον λόγο κάναμε και επιπλέον μετρήσεις από αέρα με την χρήση ειδικού μικροφώνου που συνδέεται με την κάρτα ήχου. Με αυτό το τρόπο το κουτί θα είναι ελεύθερο να ταλαντωθεί χωρίς να το επηρεάζει ο κρύσταλλος.

Επίσης παρατηρήσαμε ότι η καταπόνηση που δέχεται το κουτί από τον ταλαντωτή (σφυράκι) επηρεάζει τον τρόπο ταλάντωσης άρα και τις ιδιοσυχνότητες οπότε η μέτρηση από αέρα με την χρήση μικροφώνου έγινε με καινούργιο ανέπαφο κουτί καθώς τα κουτάκια που είχαμε ήδη μετρήσει με τον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο είχαν καταπονηθεί και δεν ήταν έμπιστες οι μετρήσεις τους. Έτσι χρησιμοποιήσαμε ίδιο εμπορικό κουτάκι για να μην υπάρξει κάποιο σφάλμα στις μετρήσεις μας.



Εικόνα 6.2.6 Μέτρηση από αέρα με την χρήση μικροφώνου

Για την σωστή αρχειοθέτηση και σύγκριση των πειραματικών δεδομένων αποφασίσαμε να δημιουργήσουμε ένα μοντέλο που να περιγράφει τα χαρακτηριστικά του κάθε πειράματος. Το μοντέλο είναι της μορφής :

(1,M1,S1) (1,M1,S2) (1,M2,S1) (1,M2,S2)

Όπου:

1,2,3: το κουτάκι που τίθεται προς εξέταση

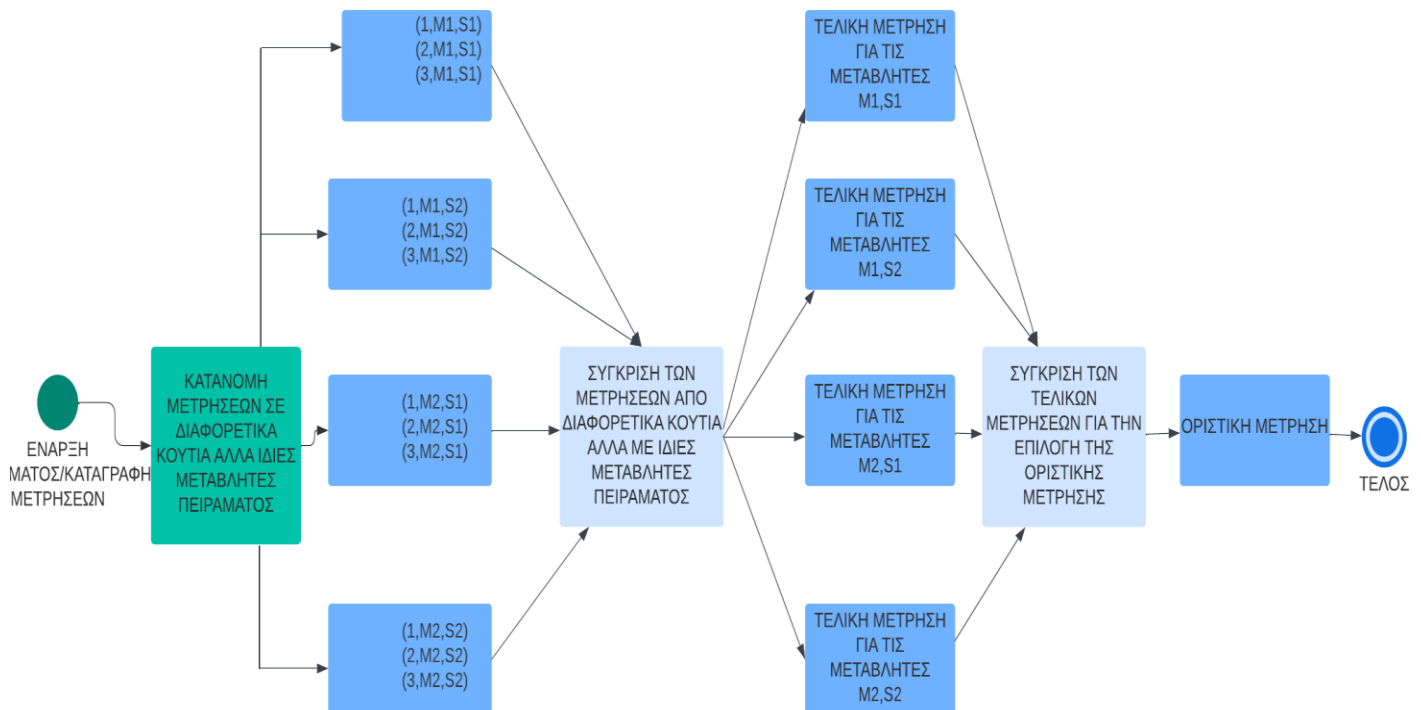
M1,M2: Το σημείο τοποθέτησης του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλους

S1,S2: Το σημείο κρούσης του ταλαντωτή

Το μοντέλο συνεχίζει βηματικά μέχρι να φτάσουμε στην τελευταία μέτρηση δηλαδή (3,M2,S2).

Τα πειραματικά δεδομένα θα συγκριθούν μεταξύ τους με λογική αντιστοιχία δηλαδή το κουτί 1 με σημείο τοποθέτησης του κρυστάλλου στην θέση M1 και σημείο κρούσης του ταλαντωτή στην θέση S1(1,M1,S1), θα συγκριθεί με τα πειραματικά δεδομένα του κουτιού 2 με σημείο τοποθέτησης του κρυστάλλου στην θέση M1 και σημείο κρούσης του ταλαντωτή είναι στην θέση S1(2,M1,S1) και του κουτιού 3 με σημείο τοποθέτησης του κρυστάλλου στην θέση M1 και σημείο κρούσης του ταλαντωτή στην θέση S1 (3,M1,S1). Ενώ θα συνεχίσει αυτή η πειραματική αλληλουχία μέχρι να συγκριθούν όλες οι μεταβλητές του πειράματος μεταξύ τους.

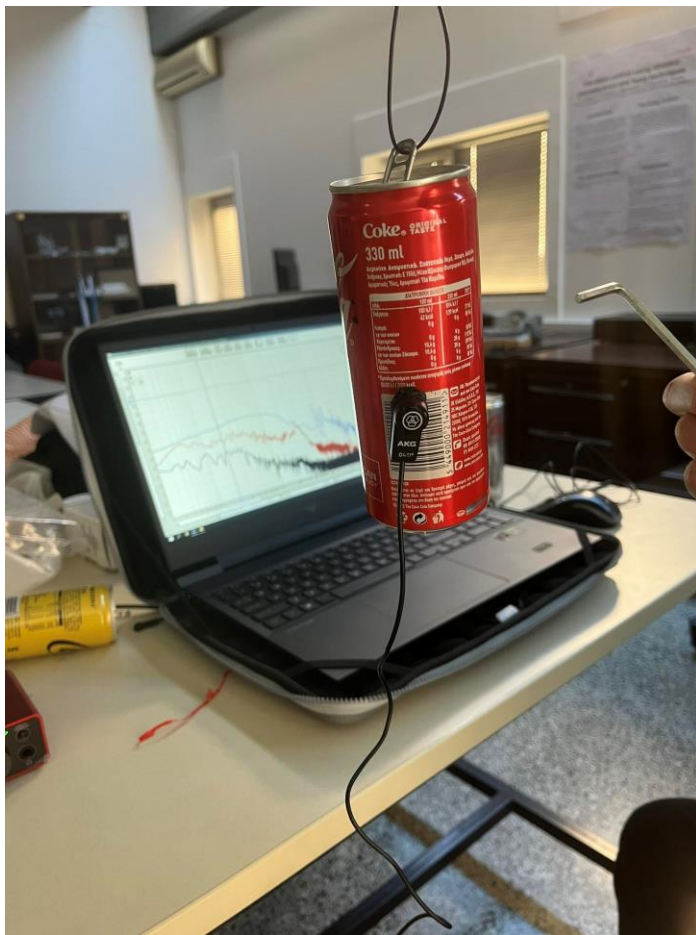
Στο τέλος θα συγκρίνουμε την οριστική μέτρηση, με την μέτρηση από αέρα για την επικαιροποίηση των δεδομένων μας. Παρακάτω ακολουθεί ένα διάγραμμα ροής που οπτικοποιεί καλύτερα την συλλογιστική πορεία που ακολουθήσαμε.



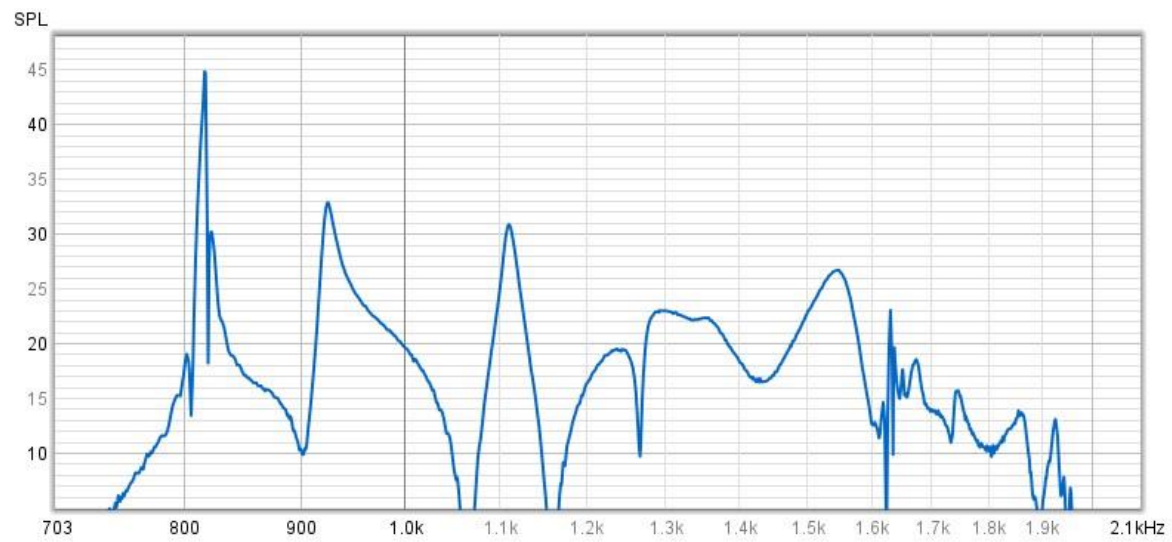
6.3 Πειραματικά αποτελέσματα

6.3.1 Μετρήσεις στην θέση (M1,S1)

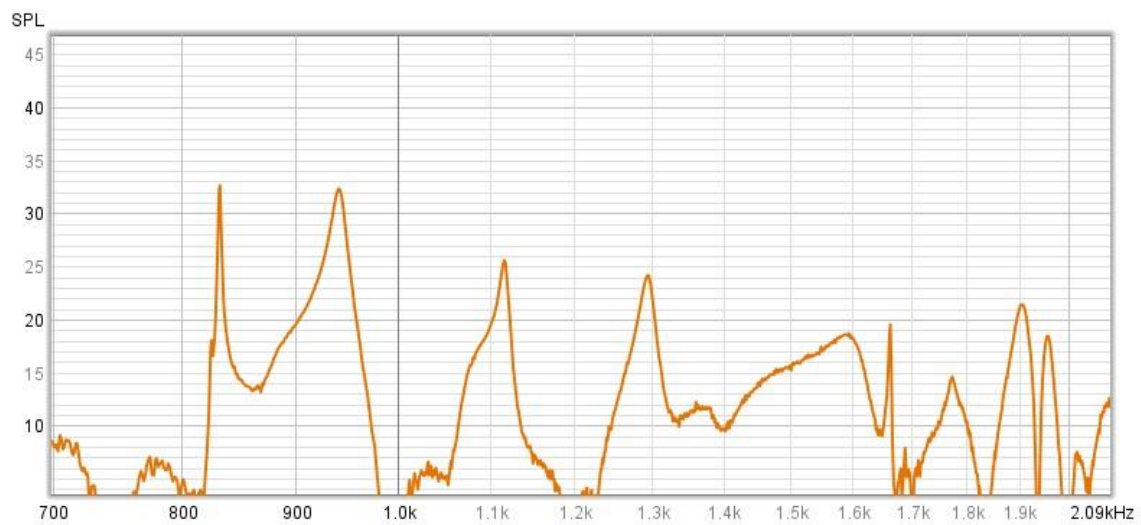
Παρακάτω παραθέτονται τα αποτελέσματα που αντλήθηκαν από το πείραμα που κάναμε στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Ξεκινώντας με την τοποθεσία του μαγνήτη στην θέση **M1** και την τοποθεσία του ταλαντωτή στην θέση **S1 (M1,S1)**. Για την καταγραφή των ιδιοσυχνοτήτων έγινε χρήση του δωρεάν λογισμικού RoomEqWizard(REW).



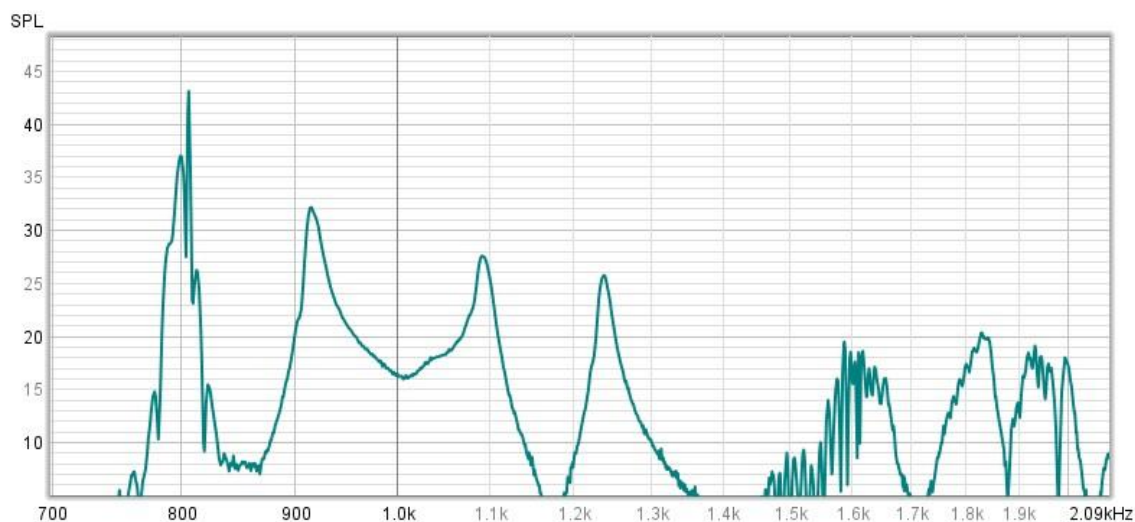
Εικόνα 6.3.1 Μέτρηση με την χρήση πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου



Εικόνα 6.3.2 μέτρηση του κουτιού 1 (1,M1,S1)

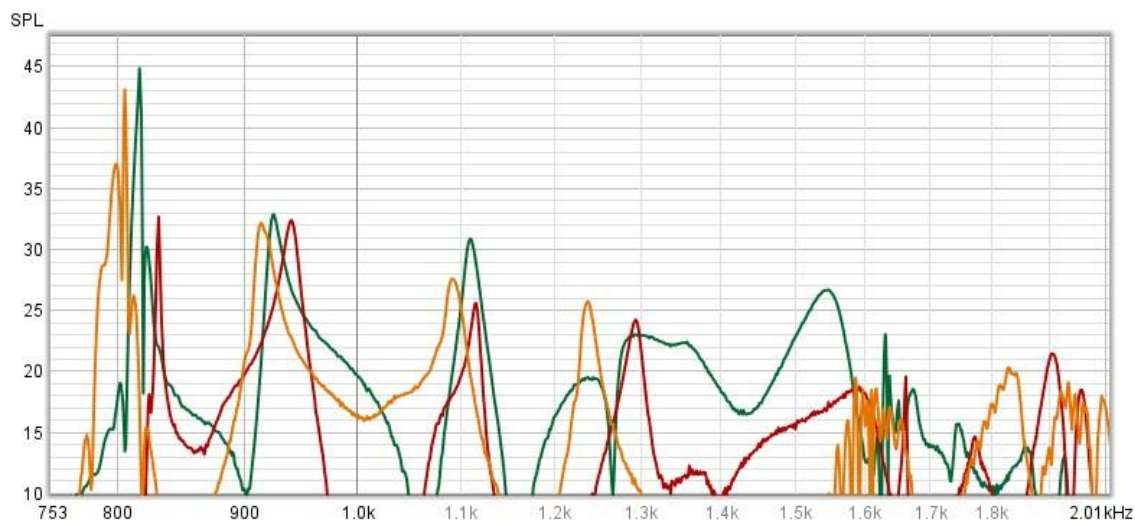


Εικόνα 6.3.3 μέτρηση του κουτιού 2 (2,M1,S1)



Εικόνα 6.3.4 μέτρηση του κουτιού 3 (3,M1,S1)

Ενώ και οι μετρήσεις και των 3 κουτιών μαζί συμπυκνωμένες στην ίδια γραφική παράσταση:



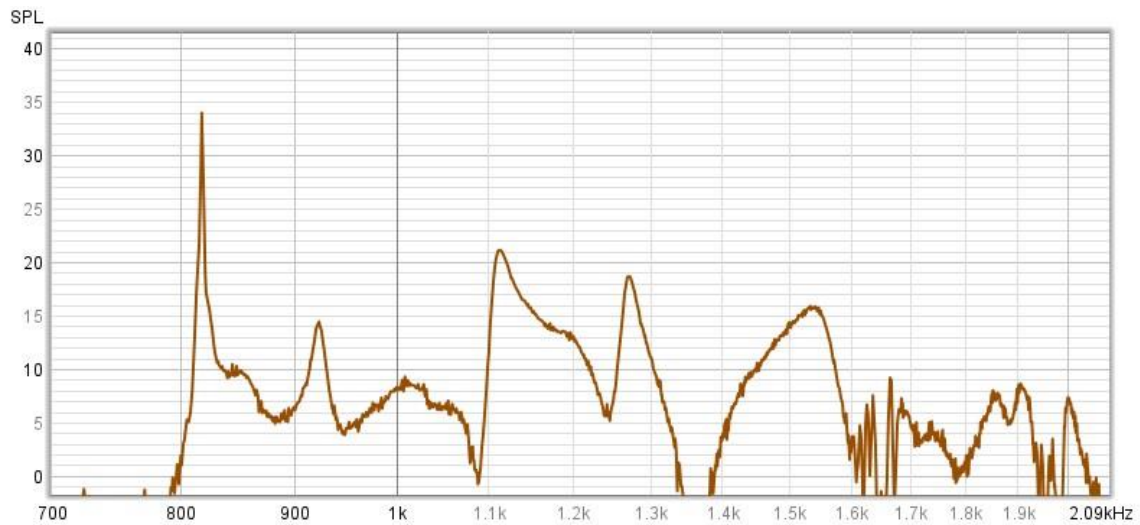
Εικόνα 6.3.5 Συμπυκνωμένες οι τρεις μετρήσεις σε μια γραφική παράσταση

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων μας για την θέση (M1,S1) επιβεβαιώνουν τις αστοχίες που περιμέναμε να δούμε από κουτί σε κουτί, αφού δεν υπάρχει μια σταθερή γεωμετρική βάση ανά κουτί ενώ ακόμη και το ίδιο το υλικό αλλάζει από κουτί σε κουτί επειδή δεν υπάρχει σταθερή σύσταση μεταξύ αλουμινίου και του πλαστικού υλικού που ψεκάζονται τα κουτιά. Εύλογα παρατηρούμε διαφορετικές τιμές στις πρώτες ιδιοσυχνότητες ανά κουτί αλλά και διαφορετικά πλάτη ταλάντωσης. Για παράδειγμα η 1^η ιδιοσυχνότητα για το κουτί 1 είναι στα 820Hz,

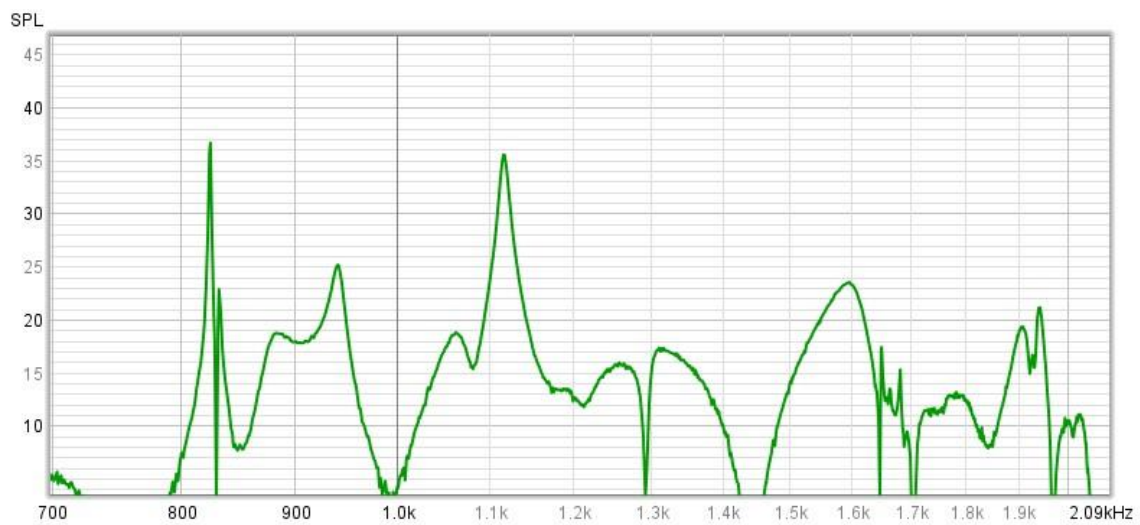
για το κουτί 2 στα 840Hz και για το κουτί 3 στα 805 Hz. Ενώ παρατηρείται αυτή η αλληλουχία και στις επόμενες ιδιοσυχνότητες.

6.3.2 Μετρήσεις στην θέση (M1,S2)

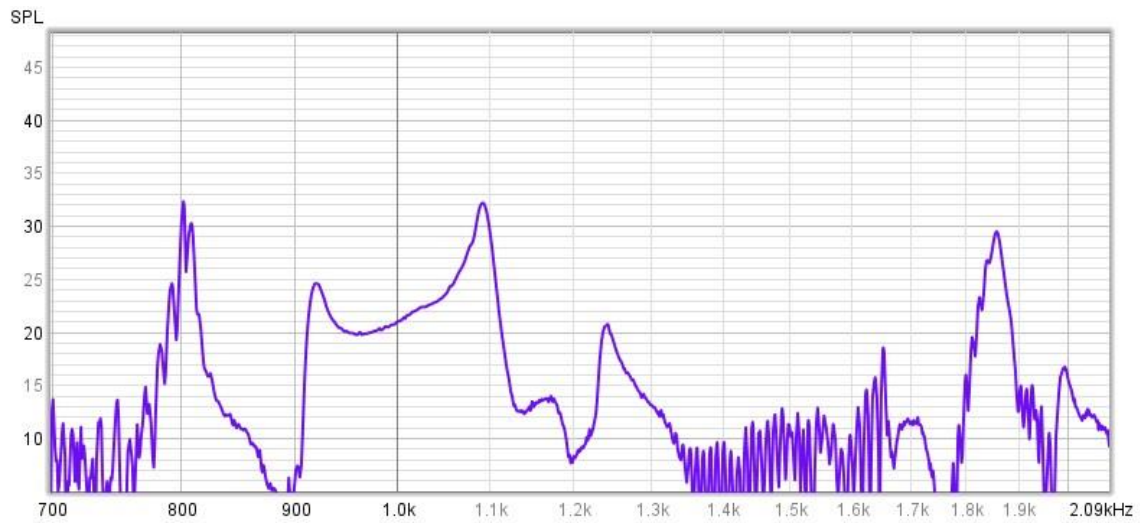
Στην συνέχεια του πειράματος κρατήσαμε σταθερή την θέση του κρυστάλλου(**M1**) αλλά αλλάξαμε την θέση του ταλαντωτή (**S2**). Παρακάτω παραθέτονται τα αποτελέσματα για την θέση (**M1,S2**):



Εικόνα 6.3.6 Μέτρηση του κουτιού 1 (1,M1,S2)

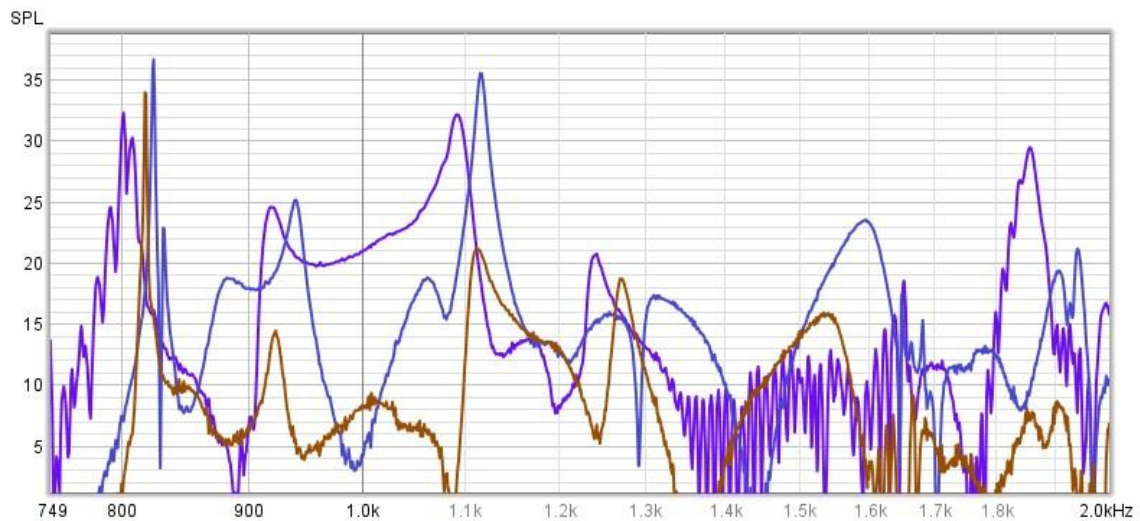


Εικόνα 6.3.7 Μέτρηση του κουτιού 2 (2,M1,S2)



Εικόνα 6.3.8 Μέτρηση του κουτιού 3 (3,M1,S2)

Ενώ και οι μετρήσεις και των 3 κουτιών μαζί συμπυκνωμένες στην ίδια γραφική παράσταση:



Εικόνα 6.3.9 Συμπυκνωμένες οι τρεις μετρήσεις σε μια γραφική παράσταση

Οι μετρήσεις για την θέση S2 του πειράματος επαληθεύουν τον ισχυρισμό μας περί διαφορετικότητας μεταξύ κουτιών αν και μπορούμε να διακρίνουμε μια σταθερότητα στις πρώτες τρεις ιδιοσυχνότητες όπου ταυτίζονται με τα πειραματικά δεδομένα στην θέση S1, καθώς η απόκλιση τους δεν υπερβαίνει τα 3-4 Hz όπου είναι λογικό καθώς γνωρίζουμε ότι

οι ιδιοσυχνότητες είναι ιδιότητες του ίδιου του συστήματος, που καθορίζονται αποκλειστικά από τη γεωμετρία του, τις ιδιότητες του υλικού και τις οριακές συνθήκες.

Επίσης μπορούμε να διακρίνουμε στην θέση S2 δεν είναι τόσο “καθαρά” των πλάτη των ταλαντώσεων σε σχέση με την θέση S1, όπου επιτυγχάνουμε καλύτερο εύρος ταλάντωσης αυτό συμβαίνει διότι όταν ο ταλαντωτής βρίσκεται στο κέντρο του κουτιού ενεργοποιούνται διάφοροι παράγοντες που συμβάλλουν στην μεγιστοποίηση του πλάτους, όπου παραθέτονται παρακάτω:

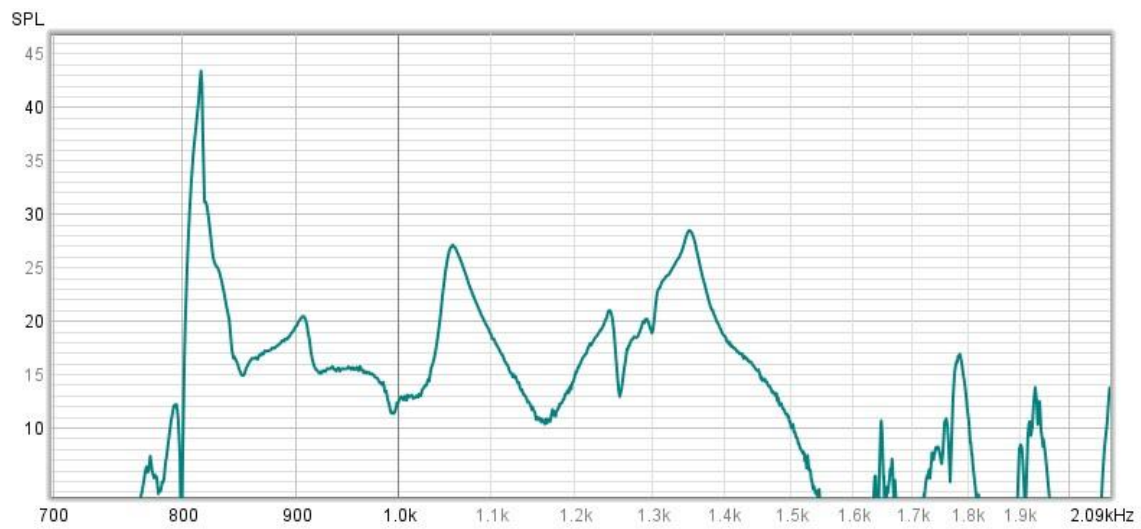
1. Συμμετρία: Το κέντρο του κουτιού αποτελεί σημείο συμμετρίας για την κίνηση του ταλαντωτή. Στο σημείο αυτό, οι δυνάμεις που ασκούνται στον ταλαντωτή εξισορροπούνται, με αποτέλεσμα να υπάρχει ελάχιστη αντίσταση στην κίνησή του. Αυτό επιτρέπει στον ταλαντωτή να μεταβαίνει ομαλά μεταξύ των ακραίων θέσεων του, διευκολύνοντας τη μέγιστη μετατόπιση και, κατά συνέπεια, το μέγιστο πλάτος ταλάντωσης.
2. Μεταφορά ενέργειας: Καθώς ο ταλαντωτής πλησιάζει το κέντρο του κουτιού, η δυνητική ενέργεια μετατρέπεται σταδιακά σε κινητική ενέργεια. Στο κέντρο, όπου η δυνητική ενέργεια είναι ελάχιστη, η κινητική ενέργεια μεγιστοποιείται. Αυτή η διαδικασία μεταφοράς ενέργειας επιτρέπει στον ταλαντωτή να επιτυγχάνει μεγαλύτερες ταχύτητες καθώς διέρχεται από το κέντρο, ενισχύοντας έτσι την ορμή και το πλάτος ταλάντωσής του.
3. Διατήρηση της ενέργειας: Στο κέντρο του κουτιού, η συνολική μηχανική ενέργεια του ταλαντωτή είναι κυρίως κινητική, καθώς η δυναμική ενέργεια ελαχιστοποιείται. Αυτή η κατάσταση υψηλής κινητικής ενέργειας επιτρέπει στον ταλαντωτή να υπερνικήσει τυχόν εναπομείνουσες δυνάμεις τριβής ή απόσβεσης που υπάρχουν στο σύστημα, επιτρέποντάς του να διατηρήσει ταλαντωτική κίνηση με μέγιστο πλάτος.
4. Συντονισμός: Όταν ο ταλαντωτής χτυπήσει το κέντρο του κουτιού με επαρκή ενέργεια, μπορεί να συντονιστεί με τη φυσική συχνότητα του συστήματος. Ο συντονισμός εμφανίζεται όταν η συχνότητα της εφαρμοζόμενης δύναμης ταυτίζεται με τη φυσική συχνότητα του ταλαντωτή, με αποτέλεσμα ενισχυμένες ταλαντώσεις. Στο κέντρο του κιβωτίου, οι συνθήκες μπορεί να είναι βέλτιστες για την εμφάνιση συντονισμού, ενισχύοντας περαιτέρω το πλάτος της ταλάντωσης.

6.3.3 Μετρήσεις στην θέση (M2,S1)

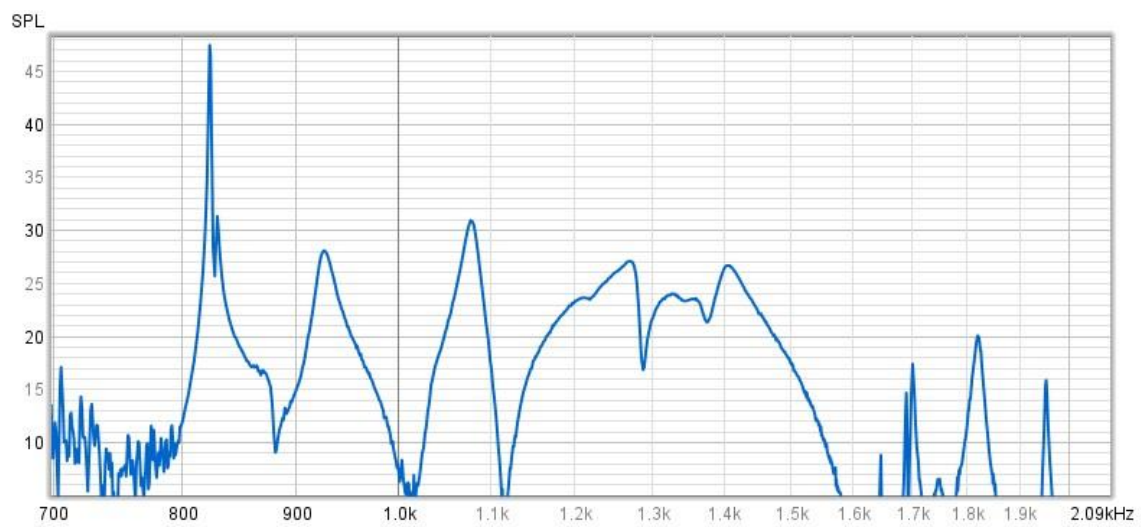
Στην συνέχεια του πειράματός μας μετακινήσαμε τον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο στην θέση **M2**(Measurement 2) για να καλύψουμε ένα μεγαλύτερο φάσμα μεταβλητών στο πείραμα μας ενώ πειραματιστήκαμε στις θέσεις όπου είχαμε δηλώσει και ανωτέρως δηλαδή της **S1** και **S2**. Το πείραμα διεξήχθη στα ίδια κουτιά όπου έγιναν και οι μετρήσεις για την θέση M1 ώστε να μην υπάρξουν αστοχίες λόγω της γεωμετρίας των υλικών. Παρακάτω παραθέτονται τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις μας.



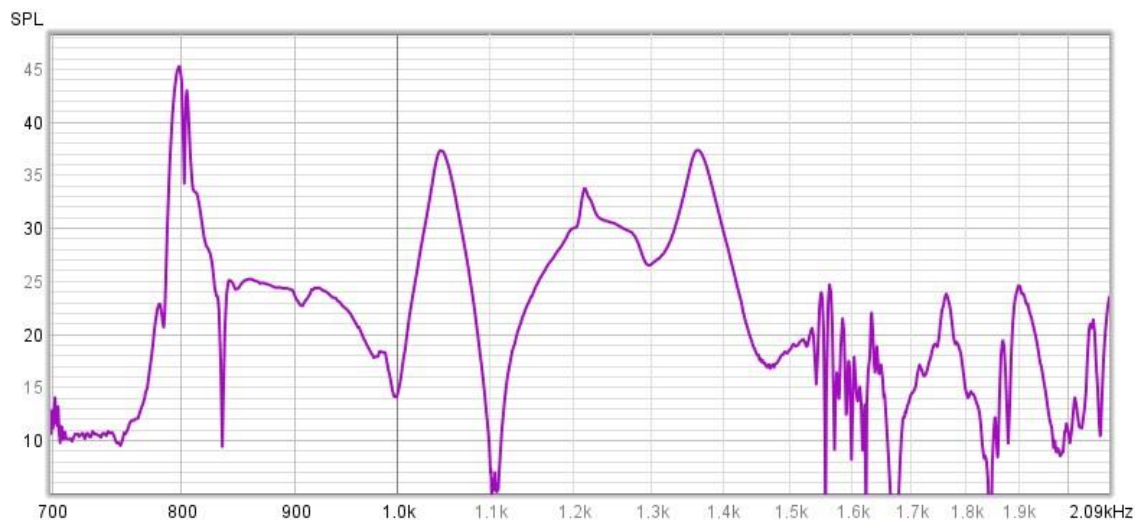
Εικόνα 6.3.10 Τοποθέτηση του κρυστάλλου στην θέση M2



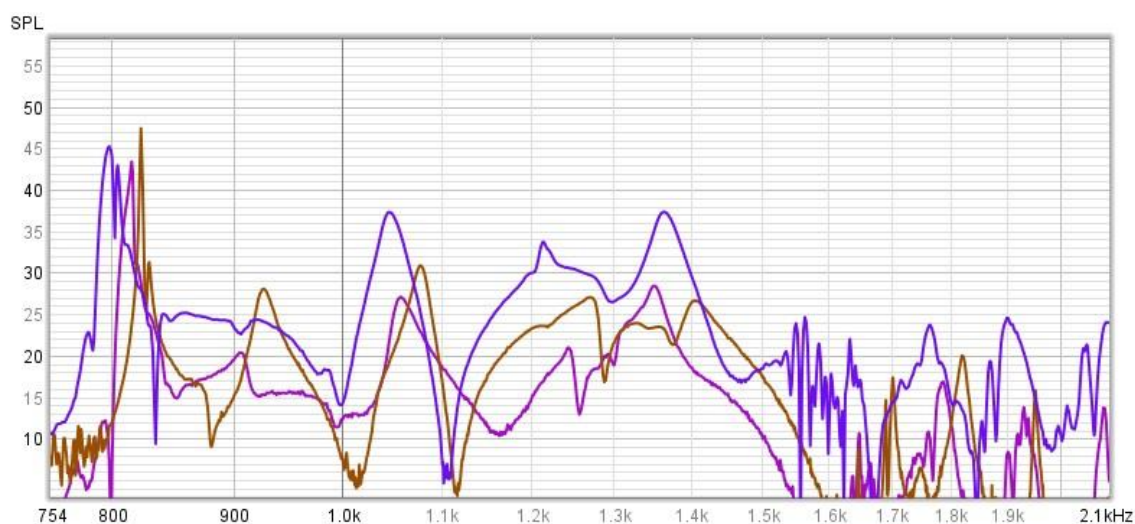
Εικόνα 6.3.11 μέτρηση του κουτιού 1 (1,M2,S1)



Εικόνα 6.3.12 μέτρηση του κουτιού 2 (2,M2,S1)



Εικόνα 6.3.13 μέτρηση του κουτιού 3 (3,M2,S1)



Εικόνα 6.3.14 Συμπυκνωμένες οι τρεις μετρήσεις σε μια γραφική παράσταση

Για ακόμη μια φορά μπορούμε να διακρίνουμε την διαφορά στις μετρήσεις μας από κουτί σε κουτί ενώ παρατηρείται άλλη μια σταθερότητα μεταξύ των πρώτων ιδιοτιμών. Το ενδιαφέρον σε αυτές τις μετρήσεις όπου αλλάξαμε την θέση του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου είναι ότι καταφέραμε να “ανακαλύψουμε” κάποιες άλλες ιδιοσυχνότητες τις οποίες ο πρώτος κρύσταλλος δεν μπορούσε να υπολογίσει για διάφορους λόγους οι οποίοι επεξηγούνται παρακάτω.

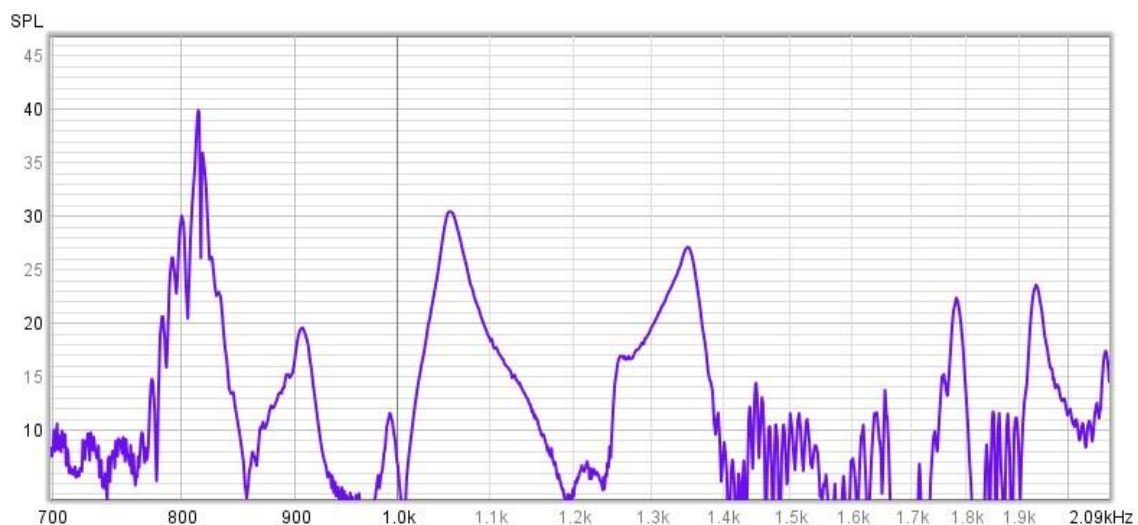
Συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι στο πρώτο κουτί εμφανίζεται μια ιδιοτιμή στα 906Hz και συγκεκριμένα στο δεύτερο μήκος ταλάντωσης ενώ στην πρώτη μέτρηση η δεύτερη ιδιοτιμή εμφανίζεται στα 927Hz. Αυτή η μέτρηση επιβεβαιώνει ότι η τοποθέτηση

ενός πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου σε ένα κουτί μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τον υπολογισμό των ιδιοσυχνοτήτων και των πλατών ταλάντωσης λόγω της περίπλοκης αλληλεπίδρασης μεταξύ της μηχανικής σύζευξης του κρυστάλλου με το κουτί και των πιεζοηλεκτρικών ιδιοτήτων του.

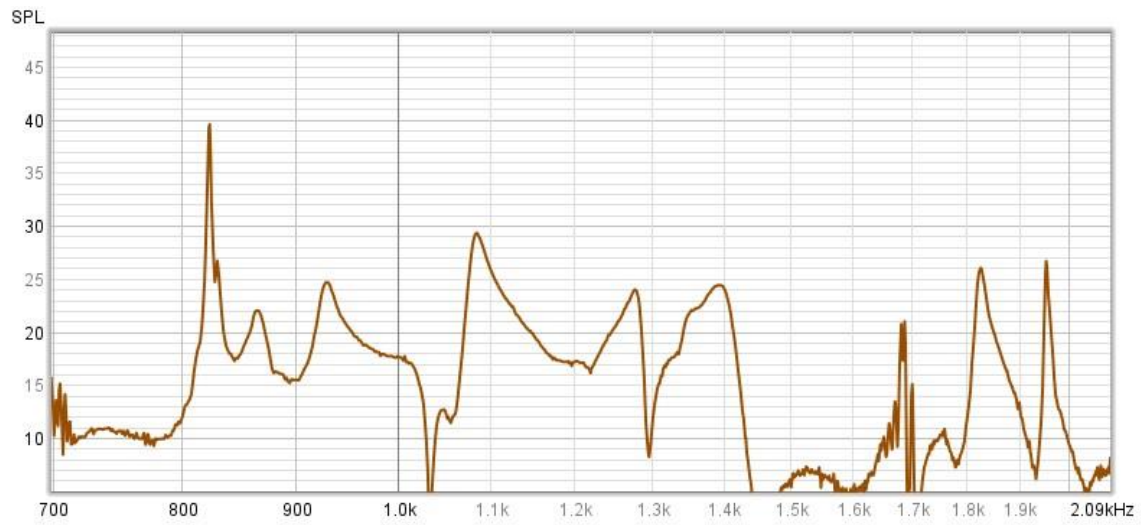
Και αυτό συμβαίνει διότι όταν τοποθετήσουμε στρατηγικά τον κρύσταλλο σε κομβικά ή αντικομβικά σημεία ταλάντωσης, όπου τα πλάτη ταλάντωσης είναι είτε ελάχιστα είτε μέγιστα, ο κρύσταλλος καταπονείται από διαφορετικούς βαθμούς μηχανικής παραμόρφωσης. Στα κομβικά σημεία, όπου η μετατόπιση είναι ελάχιστη, η μηχανική τάση που ασκείται στον κρύσταλλο είναι σχετικά χαμηλή, με αποτέλεσμα τη μειωμένη πιεζοηλεκτρική απόκριση. Αντίθετα, η τοποθέτηση του κρυστάλλου σε αντιδιαμετρικά σημεία, που χαρακτηρίζονται από μέγιστα πλάτη μετατόπισης, ενισχύει τη μηχανική τάση που υφίσταται ο κρύσταλλος, ενισχύοντας την πιεζοηλεκτρική του έξοδο. Επιπλέον, ο προσανατολισμός του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου σε σχέση με τους τρόπους δόνησης του κιβωτίου επηρεάζει περαιτέρω την απόκρισή του. Η ευθυγράμμιση του κρυστάλλου παράλληλα ή κάθετα προς τη διεύθυνση της δόνησης μεταβάλλει την ευαισθησία του στη μηχανική καταπόνηση, επηρεάζοντας έτσι το μέγεθος του παραγόμενου ηλεκτρικού σήματος.[16]

6.3.4 Μετρήσεις στην θέση (M2,S2)

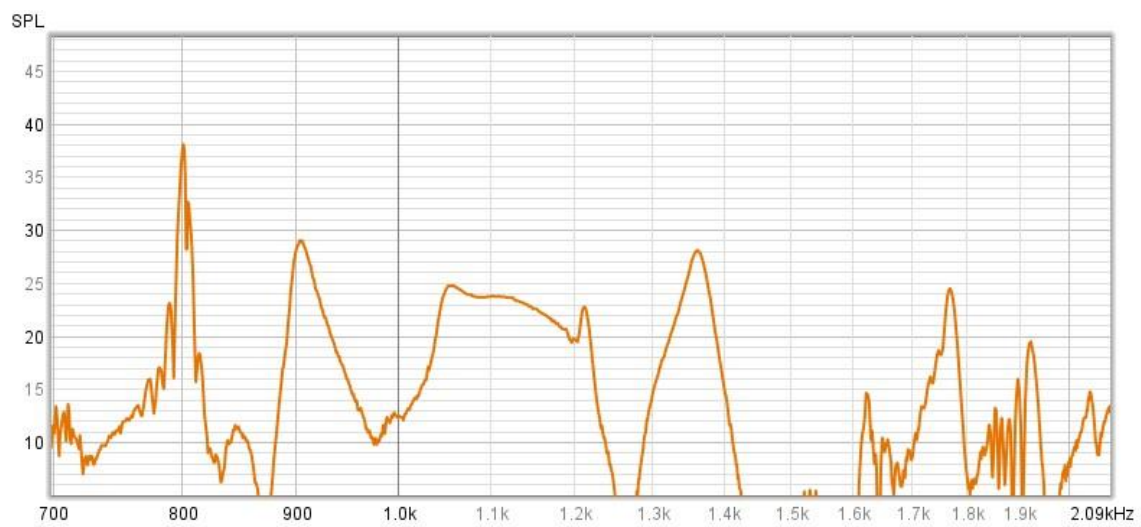
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για την θέση (M2,S2):



Εικόνα 6.3.15 Μέτρηση του κουτιού 1 (1,M2,S2)



Εικόνα 6.3.16 Μέτρηση του κουτιού 2 (2,M2,S2)



Εικόνα 6.3.17 Μέτρηση του κουτιού 3 (3,M2,S2)



Εικόνα 6.3.18 Συμπυκνωμένες οι τρεις μετρήσεις σε μια γραφική παράσταση

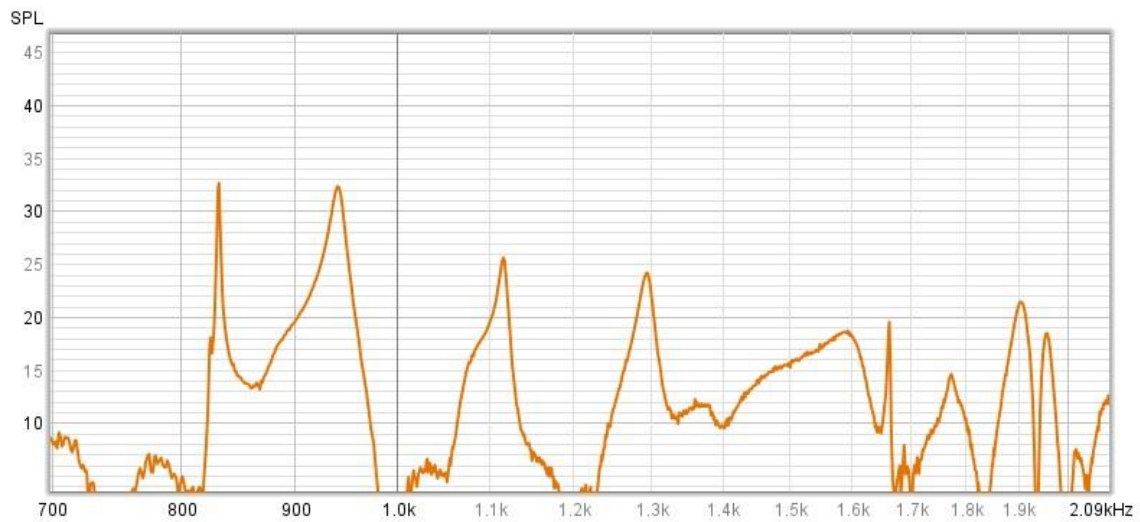
Οι μετρήσεις στην θέση (M2,S2), επιβεβαιώνουν για άλλη μια φορά το σκεπτικό το οποίο αναλύθηκε εκτενέστερα παραπάνω περί μεταπτώσεων στις ιδιοτιμές από κουτί σε κουτί αλλά και μεταβολή στον τρόπο ταλάντωσης ανάλογα με την θέση του κρυστάλλου και του σημείου ταλάντωσης.

6.3.4.1 Καταπόνηση κουτιού

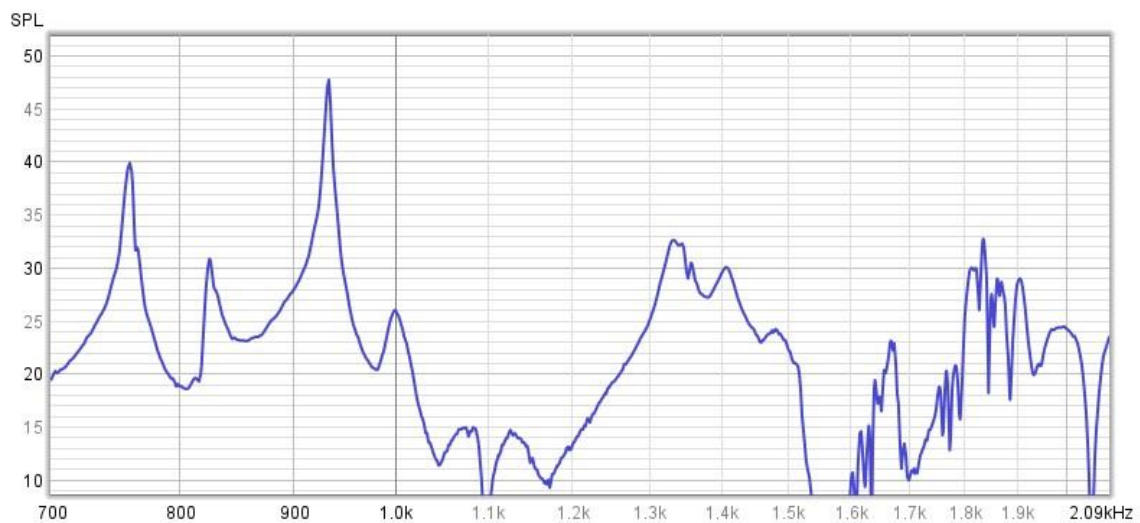
Στην συνέχεια του πειράματός μας για να ελαχιστοποιήσουμε την πιθανότητα σφάλματος λόγω της μάζας του κρυστάλλου, πειραματιστήκαμε και με την χρήση μικροφώνου δηλαδή με μέτρηση από αέρα έτσι ώστε το κουτί να είναι ελεύθερο να ταλαντωθεί, αυτή η αλλαγή στις μεταβλητές του πειράματος μας οδήγησε σε ενδιαφέροντα πορίσματα, τα οποία αναλύονται παρακάτω.

Αρχικά αρχίσαμε να πειραματιζόμαστε πάνω στα κουτιά τα οποία είχαν ήδη καταπονηθεί από τις μετρήσεις μας με τον κρύσταλλο και παρατηρήσαμε ότι οι ιδιοσυχνότητες στην μέτρηση μέσω αέρα ήταν αισθητά πιο χαμηλά από αυτές μέσω κρυστάλλου.

Έτσι τοποθετήσαμε ξανά τον κρύσταλλο στο κουτί και συγκρίναμε τις μετρήσεις μας προ και μετά καταπόνησης, τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν τον συλλογισμό μας καθώς ενώ προ καταπόνησης η 1^η ιδιοτιμή στις ίδιες μεταβλητές πειράματος ανέρχεται στα 800Hz , μετά καταπόνησης υπάρχει μεταβολή της στα 760Hz, παραθέτονται και οι γραφικές παραστάσεις.



Εικόνα 6.3.19 Μέτρηση προ καταπόνησης στην θέση (M1,S1)

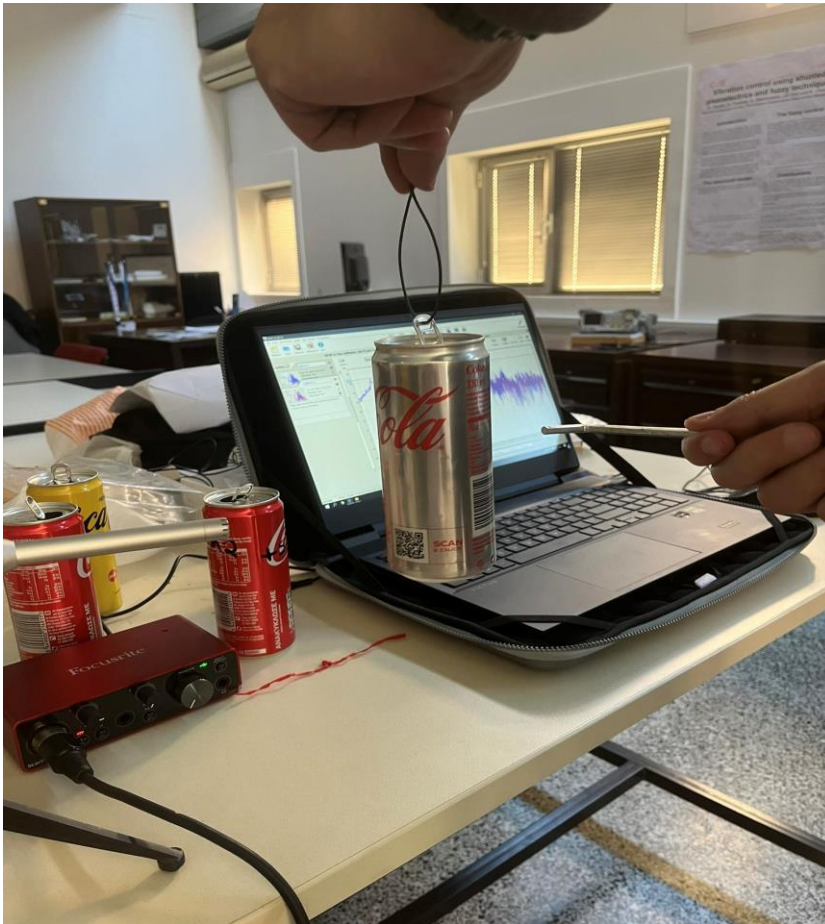


Εικόνα 6.3.20 Μέτρηση μετά καταπόνησης στην θέση (M1,S1)

Αυτή μεταβολή που παρατηρούμε στις ιδιοτιμές οφείλεται στο ότι οι εξωτερικές κρούσεις επηρεάζουν τη δομική ακεραιότητα του κουτιού, προκαλώντας, παραμορφώσεις ή συγκέντρωση τάσεων σε ορισμένες περιοχές. Αυτές οι δομικές αλλαγές μπορούν να επηρεάσουν την κατανομή της δόνησης και να μεταβάλουν τη συμπεριφορά συντονισμού του κουτιού.[15]

6.3.5 Μέτρηση με την χρήση μικροφώνου

Στην συνέχεια του πειράματος μας και λαμβάνοντας υπόψιν την παράγραφο 6.3.5 περί καταπόνησης του υλικού, αποφασίσαμε να πειραματιστούμε πάνω σε καινούργιο ανέπαφο κουτί ώστε να ελαχιστοποιήσουμε την πιθανότητα σφάλματος στην μέτρηση μέσω αέρα με την χρήση μικροφώνου.



Εικόνα 6.3.21 Μέτρηση σε καινούργιο κουτί μέσω αέρα με την χρήση μικροφώνου

Παρακάτω παραθέτονται τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις μας.



Εικόνα 6.3.22 Μέτρηση απο αέρα με την χρήση μικροφώνου

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων με την χρήση μικροφώνου είναι αρκετά ενδιαφέροντα καθώς παρατηρούμε μια μετάπτωση της 1^{ης} ιδιοτιμής στα 800Hz ενώ φανερώθηκαν και κάποιες άλλες ιδιοσυχνότητες στις οποίες δεν ήταν ικανό να τις ανιχνεύσει ο κρύσταλλος για λόγους που έχουμε αναφέρει παραπάνω.

Αυτές τις μεταβολές μπορούσαμε να τις περιμένουμε λόγω των εγγενών διαφορών μεταξύ των μετρήσεων μικροφώνου και κρυστάλλου καθώς οι μετρήσεις με μικρόφωνο, βασίζονται στα ακουστικά σήματα που παράγονται από την δόνηση του κουτιού. Το μικρόφωνο ανιχνεύει τις διακυμάνσεις της πίεσης του αέρα που προκαλούνται από τα ηχητικά κύματα, μετατρέποντας αυτές τις διακυμάνσεις σε ηλεκτρικά σήματα για ανάλυση. Ωστόσο οι μετρήσεις μέσω αέρα υπόκεινται σε διάφορους παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την ακρίβεια και την αξιοπιστία του πειράματος. Όπως ο περιβαλλοντικός θόρυβος, οι ακουστικές παρεμβολές αλλά και τα φαινόμενα του χώρου που υπάγεται το πείραμα. [14]

Δεδομένο των παραπάνω οι μετρήσεις με την χρήση μικροφώνου επιβεβαιώνουν τα πειραματικά μας δεδομένα έως τώρα, παρόλο των διαφορών που έχουν με τις μετρήσεις με κρύσταλλο. Δηλαδή ότι η μάζα του κρυστάλλου δεν επηρεάζει άμεσα την ταλάντωση του κουτιού.

6.4 Συμπεράσματα πειράματος

Τελειώνοντας την διαδικασία του πειράματος, είναι εύκολα αντιληπτό ότι η ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων ενός μεταλλικού αντικειμένου χρίζει μιας ευαίσθητης μέτρησης στην οποία πρέπει να ληφθούν πολλοί παράγοντες υπόψιν για την σωστή εξαγωγή αποτελεσμάτων. Έτσι παρόλο που μπορούμε να διακρίνουμε κάποιες διαφορές στις ιδιοτιμές ανάλογα τις συνθήκες που διεξάγεται το πείραμα, υπάρχει ένα μοτίβο που επαληθεύεται σε όλες τις περιπτώσεις και εξάγει αντίστοιχες ιδιοτιμές από κουτί σε κουτί με μικρή απόκλιση.

Για την συνέχεια της έρευνας μας θα χρησιμοποιήσουμε τις μετρήσεις από το κουτί 2 καθώς αυτό παρουσιάζει τα πιο ευκρινή αποτελέσματα συντονισμού και ιδιοτιμών. Άρα οι τελικές ιδιοτιμές που συλλέχθηκαν από το πείραμα παρουσιάζονται παρακάτω.

Eigenfrequency(Hz)
833
940
1150
1290
1587
1958

Πίνακας 6.4.1 Πειραματικά δεδομένα

7. Σύγκριση Υπολογιστικών και Πειραματικών Δεδομένων

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται σύγκριση των υπολογιστικών δεδομένων που πού υπολογίσαμε μέσω του λογισμικού Comsol Multiphysics με τα πειραματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

Υπολογιστικά Δεδομένα

Eigenfrequency(Hz)
967.71
1120.3
1286.5
1332.9
1856
1985

Πειραματικά Δεδομένα

Eigenfrequency(Hz)
833
940
1150
1290
1587
1958

Όπως μπορούμε να διακρίνουμε υπάρχουν διαφορές μεταξύ πειραματικών και υπολογιστικών δεδομένων και ειδικότερα στην πρώτη ιδιοτιμή όπου στο υπολογιστικό σκέλος εμφανίζεται στα 967.71Hz ενώ στο πειραματικό στα 833Hz, κάτι που περιμέναμε να συμβεί καθώς οι διαφορές μεταξύ της υπολογιστικής ανάλυσης ιδιοσυχνοτήτων και της πειραματικής ανάλυσης ιδιοσυχνοτήτων είναι ένα συχνό φαινόμενο που οφείλεται σε ένα συνδυασμό παραγόντων.

Αρχικά η υπολογιστική ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων βασίζεται σε μαθηματικά μοντέλα και αριθμητικούς αλγορίθμους για την προσομοίωση της ταλάντωσης ενός συστήματος. Αυτά τα μοντέλα συχνά περιλαμβάνουν απλουστεύσεις και εξιδανικεύσεις για να διευκολύνουν το υπολογιστικό κομμάτι. Ωστόσο, αυτές οι απλουστεύσεις ενδέχεται να μην αποτυπώνουν πλήρως την πολυπλοκότητα των συστημάτων του πραγματικού κόσμου, οδηγώντας σε αποκλίσεις μεταξύ υπολογιστικών προβλέψεων και πειραματικών παρατηρήσεων.

Επίσης οι ιδιότητες ενός υλικού έχουν καθοριστικό ρόλο στην ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων. Αποκλίσεις μπορεί να προκύψουν λόγω αβεβαιοτήτων στις ιδιότητες των υλικών, διαφοροποιήσεων στη συμπεριφορά των υλικών υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης ή ανακριβειών στα μοντέλα υλικών που χρησιμοποιούνται στα υπολογιστικά λογισμικά.[13]

7.1 Καινούργιο Υπολογιστικό Μοντέλο

Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω έγινε προσπάθεια ανακατασκευής του πλέγματος (Meshing) στο Comsol Multiphysics για καλύτερη προσέγγιση του πειράματος. Παρόλο την εναλλαγή τις γεωμετρίας των πεπερασμένων στοιχείων από τετράεδρα σε εξάεδρα και τριγωνικά, δεν καταφέραμε να πλησιάσουμε στην πρώτη ιδιοτιμή όπου παρουσιάζει την μεγαλύτερη απόκλιση.

Έτσι στραφήκαμε ξανά στην γεωμετρία του μοντέλου. Έγινε προσπάθεια ανακατασκευής του μοντέλου στο λογισμικό σχεδίασης με μεγαλύτερη ακρίβεια στα πάχη του κουτιού αλλά και πάλι δεν προσεγγίστηκε η 1^η ιδιοτιμή. Αυτό μας οδήγησε σε εκτενέστερη μελέτη για την διαδικασία παρασκευής του κουτιού.

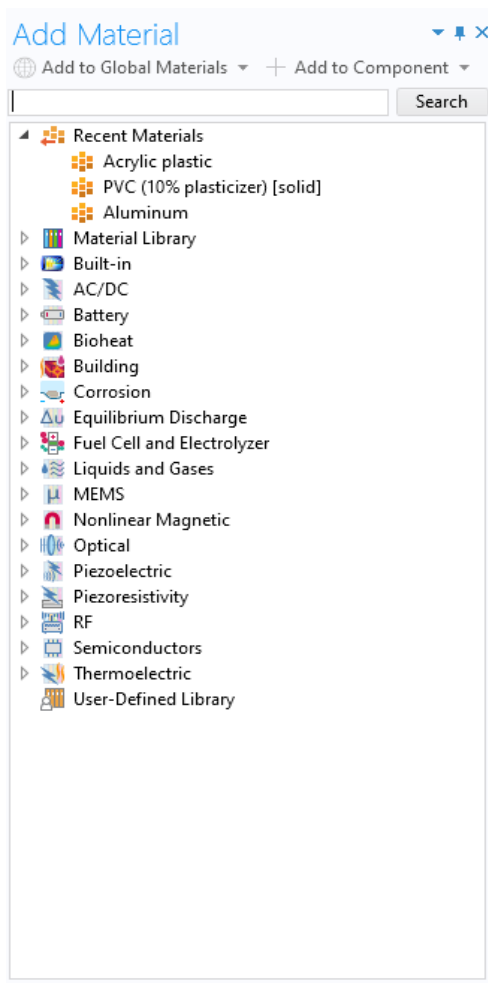
Μετά από έρευνα που έγινε στην διαδικασία παραγωγής του κουτιού βρέθηκε ότι το κουτάκι δεν αποτελείται εξ'ολοκλήρου από αλουμίνιο, καθώς η Coca-Cola ψεκάζει το εσωτερικό του κουτιού με ένα είδος πλαστικού πολυμερές, αυτό γίνεται για να αποφευχθεί η διάβρωση του αλουμινίου από τα όξινα ποτά. Αυτή ήταν μια σημαντική διαπίστωση καθώς η ύπαρξη μιας επιπλέον στρώσης διαφορετικού υλικού στο μοντέλο μας μπορεί να λειτουργήσει αποσβεστικά και να έχει σημαντική επίδραση στον τρόπο ταλάντωσης του. [17][18]



Εικόνα 2.1.1 Πλαστικό πολυμερές εσωτερικά του κουτιού

Έτσι έγινε σχεδίαση ενός επιπλέον επιπέδου(layer) εσωτερικά του κουτιού το οποίο λειτούργησε σαν την στρώση του πλαστικού πολυμερές που ψεκάστηκε. Δυστυχώς παρόλο της έρευνας που έγινε δεν μπορούσε να προσδιοριστεί το υλικό που ψεκάζεται καθώς και το πάχος της στρώσης που δημιουργείται. Όποτε έγινε εισαγωγή ενός πολυμερούς πλαστικού μέσω της βιβλιοθήκης του Comsol Multiphysics και εισάχθηκε προσεγγιστικά το πάχος του πλαστικού.

Εικόνα 7.1.2 Εισαγωγή ακρυλικού πλαστικού



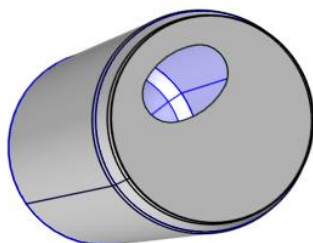
Σκοπός είναι να αποδειχθεί ότι η ύπαρξη του πλαστικού πολυμερές λόγω της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του (δηλαδή διαχέει ενέργεια (ιξώδες) αλλά και αποθηκεύει ενέργεια (ελαστικότητα)) του λειτουργεί αποσβεστικά στο σύστημα και για αυτό τον λόγο δεν μπορεί να προσεγγιστεί η 1^η ιδιοτιμή[12].



Εικόνα 7.1.2 Εισαγωγή Αλουμίνιου στο εξωτερικό μέρος του κουτιού



Εικόνα 7.1.3 Εισαγωγή Αλουμίνιου στο εξωτερικό μέρος του κουτιού



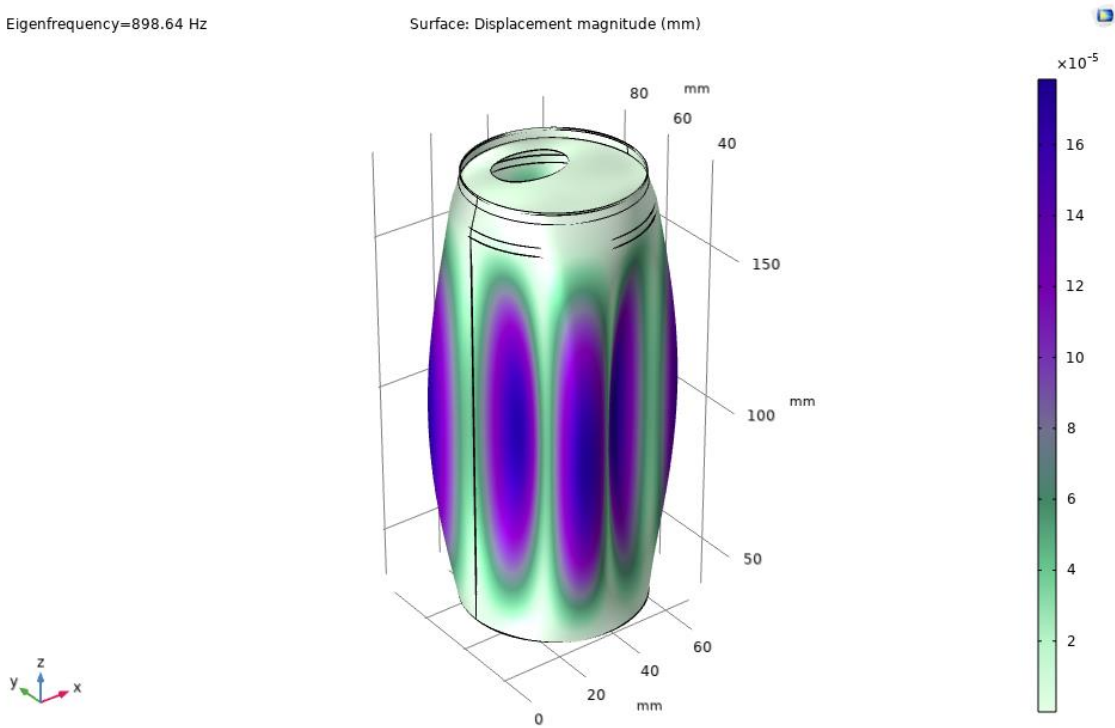
Εικόνα 7.1.4 Εισαγωγή Πλαστικού Πολυμερές στο εσωτερικό μέρος του κουτιού

Μετά από την εισαγωγή του πλαστικού εκτελέσαμε το πρόγραμμα και αποδείχθηκε σωστός ο συνειρμός μας καθώς η τιμή της 1^{ης} ιδιοτιμής από τα **967 Hz** “έπεσε” στα **898 Hz**. Μια σημαντική μετάπτωση της τάξεις των **70 Hz**, η οποία προσεγγίζει την 1^η πειραματική ιδιοτιμή που ανέρχεται στα **833 Hz**, ενώ υπήρξε γενικώς καλύτερη προσέγγιση των υπολογιστικών και πειραματικών ιδιοσυχνοτήτων. Αναλυτικά οι καινούργιες ιδιοτιμές και οι ιδιομορφές τους οι οποίες θα συγκριθούν με τα πειραματικά αποτελέσματα.

1^η Ιδιομορφή

Eigenfrequency=898.64 Hz

Surface: Displacement magnitude (mm)

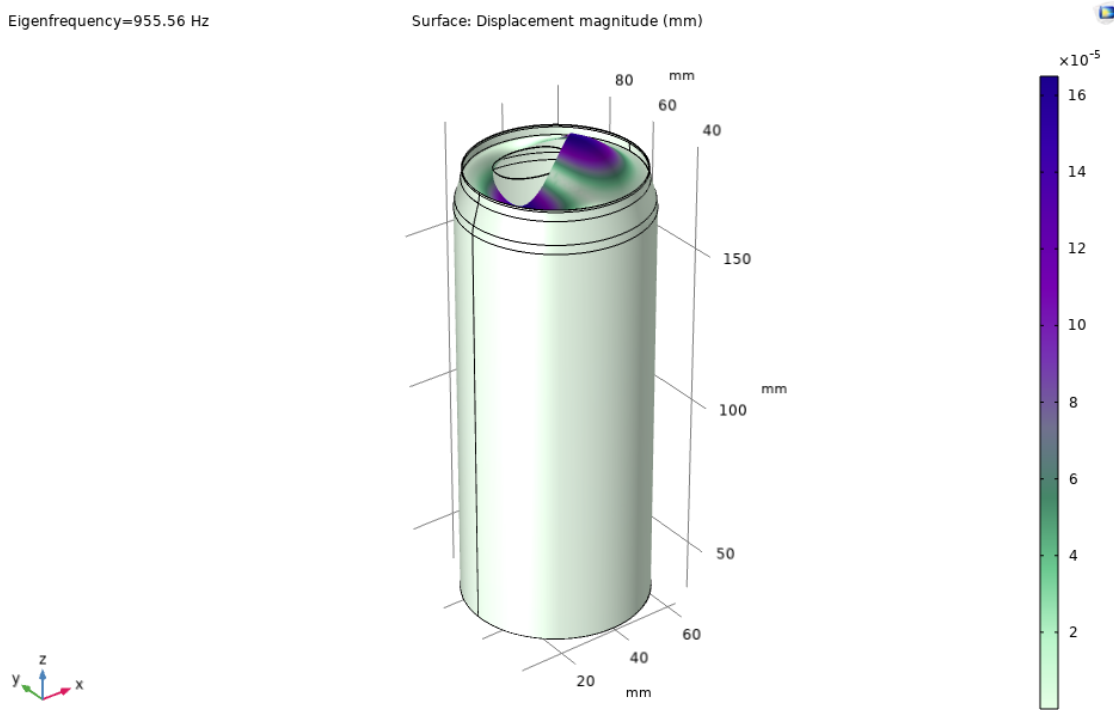


Εικόνα 7.1.5 1η Ιδιομορφή

2^H Ιδιομορφή

Eigenfrequency=955.56 Hz

Surface: Displacement magnitude (mm)

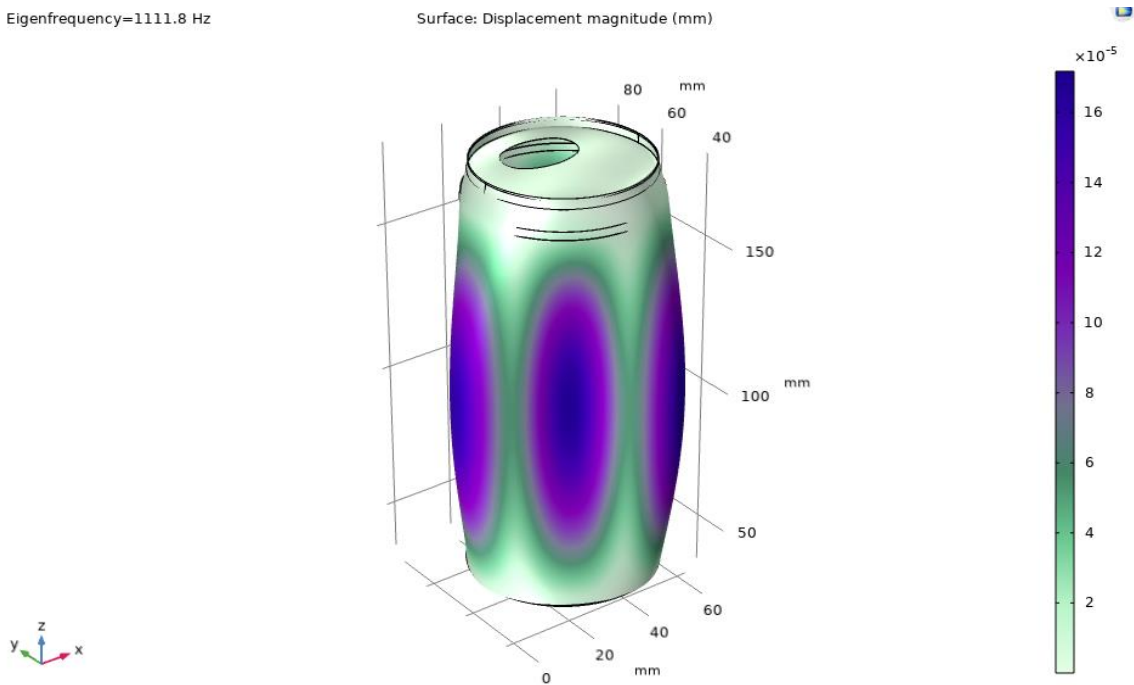


Εικόνα 7.1.6 2η Ιδιομορφή

3^η Ιδιομορφή

Eigenfrequency=1111.8 Hz

Surface: Displacement magnitude (mm)

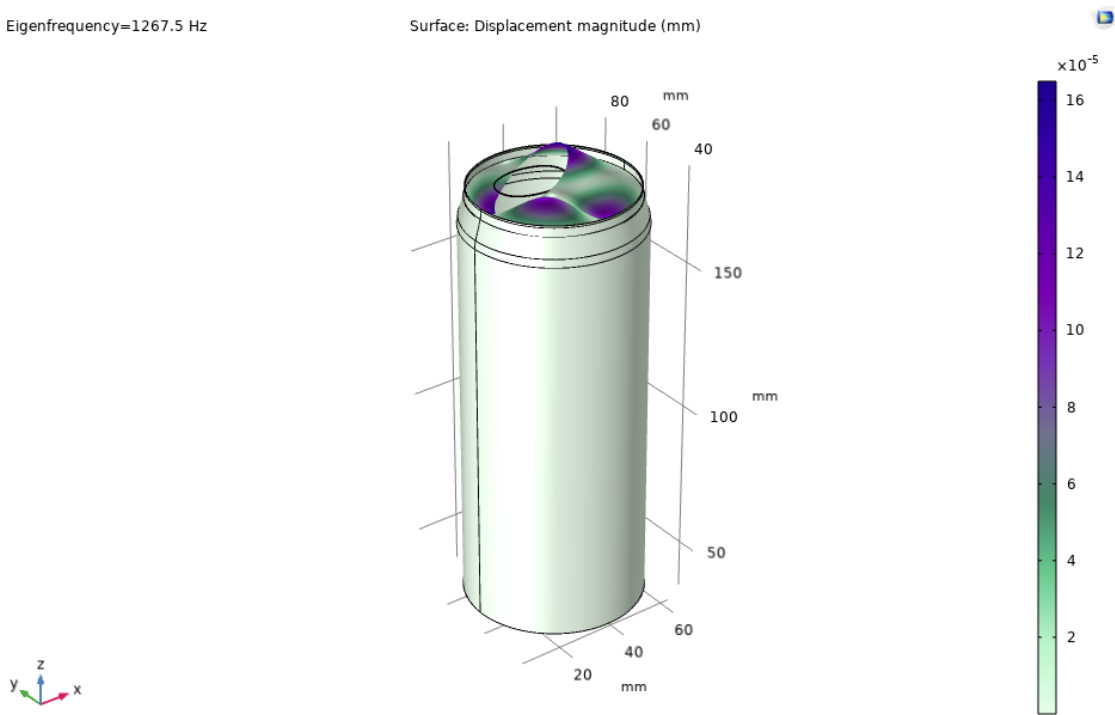


Εικόνα 7.1.7 3^η Ιδιομορφή

4^η Ιδιομορφή

Eigenfrequency=1267.5 Hz

Surface: Displacement magnitude (mm)

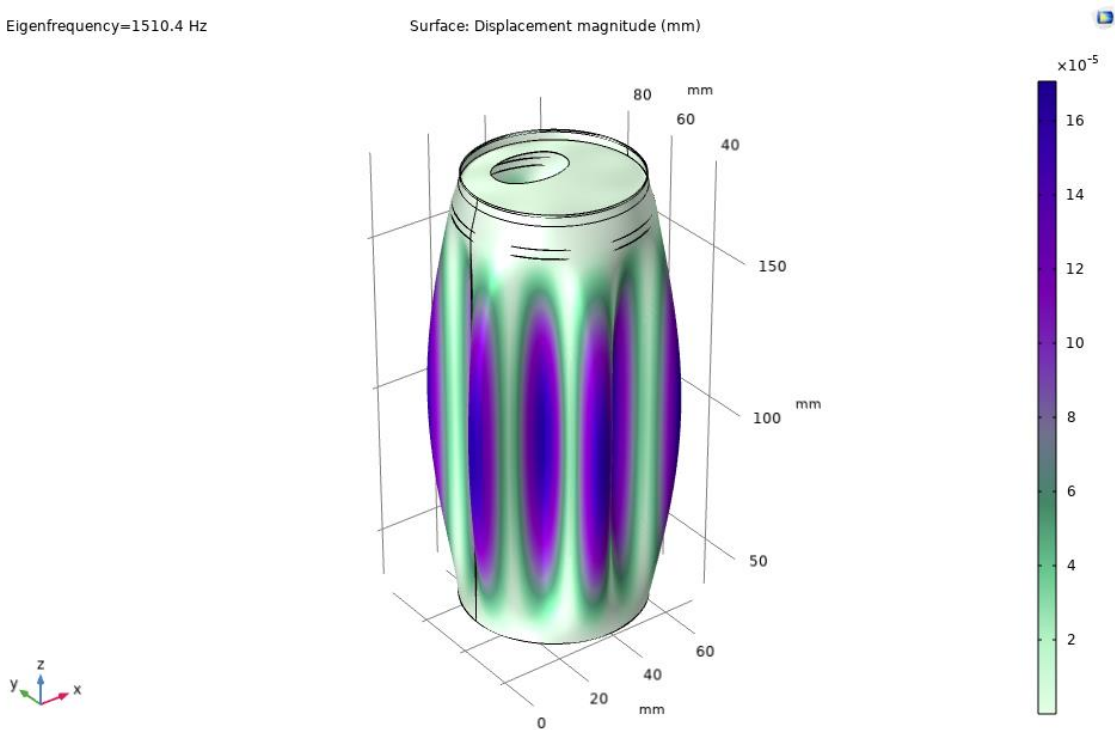


Εικόνα 7.1.3 4η Ιδιομορφή

5^η Ιδιομορφή

Eigenfrequency=1510.4 Hz

Surface: Displacement magnitude (mm)

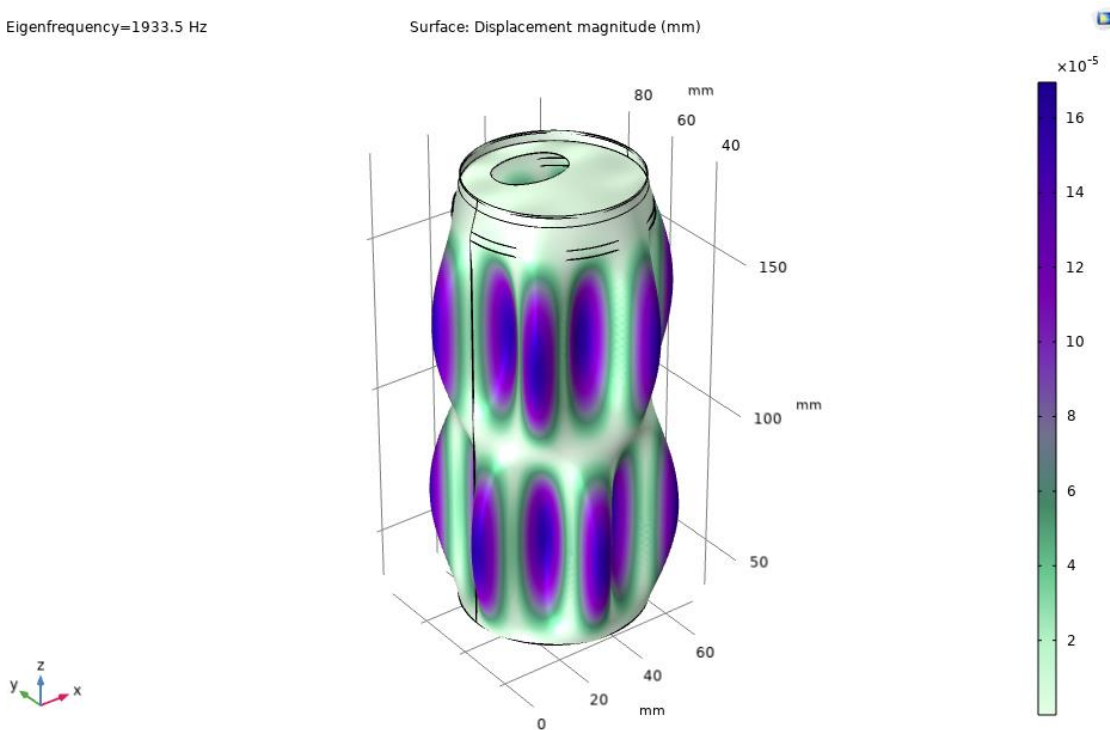


Εικόνα 7.1.4 5η Ιδιομορφή

6η Ιδιομορφή

Eigenfrequency=1933.5 Hz

Surface: Displacement magnitude (mm)



Εικόνα 7.1.5 6η Ιδιομορφή

Αναλυτικά οι έξι ιδιοτιμές σε μορφή πίνακα:

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ
Eigenfrequency(Hz)
898.64
955.56
1111.6
1267.5
1511.9
1933.5

8. Συμπεράσματα και προτάσεις για το μέλλον

Ανακεφαλαιώνοντας η μελέτη των ιδιοσυχνοτήτων ενός μεταλλικού κουτιού με την χρήση των πεπερασμένων στοιχείων αλλά και η πειραματική επαλήθευση με την χρήση πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου έχριζε μιας ενδιαφέρουσας αλλά και περίπλοκης έρευνας, η οποία χρειάστηκε πολλές αλλαγές και ανακατατάξεις στην διάρκεια της ώστε να υλοποιηθεί. Συγκεκριμένα με την χρήση πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου μελετήθηκαν οι ιδιοσυχνότητες που παράγονται όταν ένα εμπορικό κουτί Coca-Cola έρθει σε κρούση με ένα ταλαντωτή. Ενώ με την χρήση των πεπερασμένων στοιχείων και του λογισμικού Comsol Multiphysics μελετήθηκαν οι ιδιομορφές και ιδιοτιμές του μεταλλικού κουτιού. Τα αποτελέσματα της έρευνας μας παρέχουν χρήσιμες γνώσεις σχετικά με την συμπεριφορά ταλάντωσης του συστήματος, τον τρόπο αλληλεπίδρασης του συστήματος του κουτιού-ταλαντωτή αλλά και της ευαισθησίας που χρήζει μια τέτοια έρευνα.

Στο πειραματικό σκέλος η χρήση του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου προσέφερε μια ευαίσθητη και άμεση μέτρηση της δονητικής απόκρισης του δοχείου, επιτρέποντας την ακριβή ανίχνευση των ιδιοσυχνοτήτων του. Έγινε και εξέταση με την χρήση μικροφώνου με μέσο διάδοσης δηλαδή τον αέρα. Ωστόσο, η ευαισθησία του πειράματος το καθιστούσε επίσης ευάλωτο σε εξωτερικές επιδράσεις, όπως οι δονήσεις του περιβάλλοντος, ο θόρυβος και οι παραλλαγές στον τρόπο ταλάντωσης, οι οποίες θα μπορούσαν να εισάγουν αβεβαιότητες και αποκλίσεις στις μετρούμενες ιδιοσυχνότητες.

Η γεωμετρική πολυπλοκότητα του μεταλλικού δοχείου, η οποία χαρακτηρίζεται από την ανισορροπία του και τις περίπλοκες εσωτερικές δομές λόγω της ύπαρξης του πλαστικού πολυμερές, υπήρξαν σημαντικές προκλήσεις τόσο στην τρισδιάστατη σχεδίαση και υπολογιστική μοντελοποίηση όσο και στην πειραματική ανάλυση του κουτιού. Συναντήθηκαν ιδιαίτερες δυσκολίες στην πλεγματοποίηση του μεταλλικού κουτιού λόγω του γεωμετρικού σχήματος και της ιδιαιτερότητας του υλικού. Και παρόλες τις προσπάθειες για την ακριβή μοντελοποίηση του συστήματος, έγιναν κάποιες απλουστεύσεις, οι οποίες οδήγησαν σε αποκλίσεις μεταξύ των υπολογιστικών και πειραματικών ιδιοσυχνοτήτων.

Στη συνέχεια της ερευνάς μας υπολογιστικά δεδομένα συγκρίνονται με τα δεδομένα που αντλήθηκαν από το πείραμα για την επιβεβαίωσής τους. Μπορεί να ειπωθεί ότι τα αποτελέσματα κατά την σύγκρισή τους έχουν επαρκή συμφωνία, καθώς στις περισσότερες ιδιοσυχνότητες είναι κοντά οι τιμές τους. Παρόλο αυτά οι αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν μεταξύ υπολογιστικών και πειραματικών ιδιοσυχνοτήτων μπορούν να αποδοθούν στις εγγενείς διαφορές μεταξύ υπολογιστικού και φυσικού συστήματος. Στην φύση του πειράματος, η οποία χρήζει μιας ευαίσθητης μέτρησης και τα πιθανά σφάλματα μέτρησης.

Επιπλέον, η παρουσία φαινομένων απόσβεσης, και η καταλυτική σχέση μεταξύ υλικού – ιδιοσυχνοτήτων εισήγαγε πολυπλοκότητες που δεν αποτυπώθηκαν πλήρως ούτε στις υπολογιστικές ούτε στις πειραματικές αναλύσεις. Το φαινόμενο της ανισοτροπίας και οι μηχανισμός διάχυσης της ενέργειας εντός του δοχείου θα μπορούσαν επίσης να έχουν επηρεάσει την απόκριση δόνησης, οδηγώντας σε αποκλίσεις μεταξύ των πειραματικών και των υπολογιστικών ιδιοσυχνοτήτων.

Συγκεκριμένα παρατηρούμε αν γίνει λεπτομερής σύγκριση των πειραματικών και υπολογιστικών ιδιοσυχνοτήτων το υπολογιστικό μοντέλο παρουσιάζει ιδιοτιμές τις οποίες ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος δεν ανίχνευσε είτε επειδή ο κρύσταλλος είχε τοποθετηθεί σε τέτοια θέση και καταπονήθηκε από διαφορετικούς βαθμούς μηχανικής παραμόρφωσης είτε λόγω προσανατολισμού του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου σε σχέση με τους τρόπους δόνησης του κουτιού (κάθετος ,οριζόντιος). Καθώς η ευθυγράμμιση του κρυστάλλου παράλληλα ή κάθετα προς τη διεύθυνση της δόνησης μεταβάλλει την ευαισθησία του στη μηχανική καταπόνηση, επηρεάζοντας έτσι το μέγεθος του παραγόμενου ηλεκτρικού σήματος.

Αναλυτικότερα διακρίνουμε την μεγαλύτερη απόκλιση στην 1^η ιδιοσυχνότητα μεταξύ υπολογιστικού **898 Hz** και πειραματικού μοντέλου **833 Hz** ένα σφάλμα της τάξης του 7%. Ενώ στην 2^η ιδιοσυχνότητα παρατηρείται οριακή ταύτιση, αφού η υπολογιστική κυμαίνεται στα **955 Hz** και η πειραματική στα **940 Hz** ένα σφάλμα της τάξης του 1.5%. Παρόμοιες συνθήκες παρατηρούνται και στην 3^η ιδιοσυχνότητα όπου η υπολογιστική κυμαίνεται στα **1111 Hz** ενώ η πειραματική στα **1150 Hz** ένα σφάλμα της τάξης του 3%. Έπειτα στην 4^η ιδιοσυχνότητα παρατηρείται η σημαντικότερη συμφωνία όπου η υπολογιστική κυμαίνεται στα **1267 Hz** και η πειραματική στα **1290 Hz** τιμές αμελητέου σφάλματος .Στην 5^η ιδιοσυχνότητα παρατηρούμε μια μικρή απόκλιση αφού η υπολογιστική ιδιοσυχνότητα κυμαίνεται στα **1511 Hz** και η πειραματική ιδιοσυχνότητα στα **1587 Hz**. Τέλος παρατηρούμε άλλη μια σημαντική συμφωνία στην τελευταία μας ιδιοσυχνότητα για το εύρος τιμών που ψάχναμε (0-2000Hz) , όπου η υπολογιστική κυμαίνεται στα **1937 Hz** και η πειραματική στα **1958 Hz** τιμές αμελητέου σφάλματος. Παρακάτω παραθέτετε αναλυτικά ο πίνακας με τις υπολογιστικές και τις πειραματικές ιδιοσυχνότητες αντίστοιχα.

Πίνακας 8.2 Σύγκριση Πειραματικών και Υπολογιστικών Ιδιοσυχνοτήτων

	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ	
	Eigenfrequency(Hz)	Eigenfrequency(Hz)	ΣΦΑΛΜΑ
1η	833	898.64	7.88%
2η	940	955.56	1.66%
3η	1150	1111.6	3.34%
4η	1290	1267.5	1.74%
5η	1587	1511.9	4.73%
6η	1958	1933.5	1.07%

Μελλοντικές επεκτάσεις για έρευνα

Συνολικά, ενώ οι υπολογιστικές και πειραματικές προσεγγίσεις παρείχαν πολύτιμες πληροφορίες για τις ιδιοσυχνότητες του μεταλλικού δοχείου, οι αποκλίσεις μεταξύ των δύο μεθόδων αναδεικνύουν τις προκλήσεις που είναι επακόλουθες στην ανάλυση δονήσεων πολύπλοκων δομών. Οι μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες θα πρέπει να επικεντρωθούν:

- Στην τελειοποίηση των μοντέλων σχεδιαστικά αλλά και στην μοντελοποίηση για την ανάλυση με την χρήση των Πεπερασμένων Στοιχείων. Ειδικότερα να γίνει έρευνα για τις ακριβείς ιδιότητες του πλαστικού υλικού αλλά και του πάχους του.
- Στη βελτίωση των πειραματικών τεχνικών, τα πειράματα να γίνουν με μεγαλύτερη ακρίβεια με την χρήση ακριβέστερου πειραματικού εξοπλισμού για την επικαιροποίηση των στοιχείων.
- Το πείραμα να εκτελεστεί σε ειδικά προσαρμοσμένο χώρο όπου θα αποκλείεται οποιοσδήποτε τυχών θόρυβος ή φαινόμενα ανάκλασης. Ιδανικά σε ένα δωμάτιο με ελάχιστες πηγές εξωτερικού θορύβου, με χοντρούς τοίχους και ελάχιστα παράθυρα. Επίσης η τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών υλικών στους τοίχους θα ελαχιστοποιούσε το φαινόμενο ανάκλασης και το πείραμα θα παρουσίαζε μεγαλύτερη ακρίβεια.

9. Βιβλιογραφία-Αναφορές

1. Physics A level revision resource: Introduction to Young's Modulus Available:<https://www.birmingham.ac.uk/study/undergraduate/schools-and-colleges/post-16/a-level-stem-resources/youngs-modulus> (accessed February 12.24)
2. Poisson's Ratio - Longitudinal Strain and Lateral Strain Available:<https://byjus.com/physics/poissons-ratio/> (accessed February 12.24)
3. Samira Mohamady, Raja Kamil Raja Ahmad, Allahyar Montazeri, Rizal Zahari, Nawal Aswan Abdul Jalil, "Modeling and Eigenfrequency Analysis of Sound-Structure Interaction in a Rectangular Enclosure with Finite Element Method", Advances in Acoustics and Vibration, vol. 2009, Article ID 371297, 9 pages, 2009. <https://doi.org/10.1155/2009/371297>
4. Sound Waves and Music - Lesson 4 - Resonance and Standing Waves Available:<https://www.physicsclassroom.com/class/sound/Lesson-4/Natural-Frequency> (accessed February 16.24)
5. Eigenfrequency Analysis: Introduction to Eigenfrequency Analysis' (accessed February 16.24) Comsol.
6. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Βασικές έννοιες. Analysis' (accessed February 19.24) [Online] Available: <http://users.ntua.gr/caridis/methodoi/keimena/chap%2003/Chapter%2003.pdf>
7. The Best FEA Mesh Density for Accuracy and Speed | MSC Nastran (July 12, 2013) (accessed February 19.24) [Online] Available:<https://simulatemore.mscsoftware.com/the-best-fea-mesh-density-for-accuracy-and-speed-msc-nastran/>
8. Αθανάσιος Μπότος, "Μελέτη φιάλης νερού με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων", Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ελλάς, 2011. <https://doi.org/10.26233/heallink.tuc.12696>
9. G. Acunzo a, N. Fiorini a, F. Mori a, D. Spina " Mechanical Systems and Signal Processing" Volume 98, 1 January 2018, Pages 580-593. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.05.014>
10. Abdul Quaiyum Ansari, The Basics of Fuzzy Logic: A Tutorial Review, Computer Education, Stafford- Computer Education Group, No. 88, pp. 5- 9, February 1998.
11. Ιορδάνης Οικονομίδης, "Διερεύνηση δυναμικών ιδιοτήτων σύνθετης δοκού δύο υλικών, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων", Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ελλάς, 2017 <https://doi.org/10.26233/heallink.tuc.70316>

12. Bueche, F. "The Viscoelastic Properties of Plastics" Phys. 22, 603–609 (1954)
<https://doi.org/10.1063/1.1740133>
13. Samira Mohamady Raja Kamil Raja Kamil Allahyar Montazeri Allahyar Montazeri Nawal Aswan Abdul Jalil Nawal Aswan Abdul Jalil "Modeling and Eigenfrequency Analysis of Sound-Structure Interaction in a Rectangular Enclosure with Finite Element Method" . January 2009(1687-6261) DOI: 10.1155/2009/371297 Available from: https://www.researchgate.net/figure/Comparison-eigenfrequency-analysis-between-simulations-analytical-and-experimental_tbl1_43170264 [accessed 24 Apr, 2024]
14. Tom Lubin "Getting great sounds, the microphone book" (2009)(71-88) [accessed 24 Apr, 2024] [Online] Available: https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=RzSGEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR3&dq=how+microphone+works&ots=k63iXYAlwt&sig=VaZKqCoAS_O6lvvFGM4-7PEkOwM&redir_esc=y#v=onepage&q=how%20microphone%20works&f=true
15. S. Caponi S. Corezzi M. Mattarelli D. Fioretto "Stress effects on the elastic properties of amorphous polymeric materials" Volume 141, Issue 21 (7 December 2014) <https://doi.org/10.1063/1.4902060>
16. Xiao-Wei Sun Gang-Gang Xu Ren-Sheng Li Mao-Ting Tan Xing-Lin Gao Wei-Bin Sun "Reconfigurable local-resonance elastic waveguides in piezoelectric phononic crystals plate" 35(8):750-759 (February 2024) DOI: 10.1177/1045389X241232728
17. Luis Fernando Folle Sergio Eglan Silveira Netto Lirio Schaeffer " Analysis of the manufacturing process of beverage cans using aluminum alloy" 205(1-3):347-352 (August 2008) DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.11.249
18. Victor Yuardi Risonarta Juliana Anggono Yosias Michael Suhendra Yahya Jani Setyo Nugrowibowo "Strategy to Improve Recycling Yield of Aluminium Cans" 130(7):01033 (January 2019) DOI: 10.1051/e3sconf/201913001033
19. Jakub Rubint "Effects of meshing density of 1D structural members with non-uniform cross-section along the length on the calculation of eigenfrequencies" 313:00004 (January 2020) DOI: 10.1051/matecconf/202031300004
20. M.I. Ramli , M.Z. Nuawi M.R.M. Rasani S. Abdullah K. K. Seng "Modal Analysis Study on Aluminum 6061 using Accelerometer and Piezoelectric Film Sensor" Volume 12, Number 5 (2017) pp. 787-792