

## **Δονητική ανάλυση κυμβάλων και καπακιών τζουρά**

Σπύρος Μπρέζας<sup>1,\*</sup>, Δέσποινα Γρηγορίου<sup>1</sup>, Ευάγγελος Κασελούρης<sup>1</sup>, Ελένη Παπαδάκη<sup>1</sup>, Ιωάννης Ορφανός<sup>1</sup>, Ευθύμιος Μπακαρέζος<sup>1</sup>, Νεκτάριος Α. Παπαδογιάννης<sup>1</sup>, Βασίλειος Δημητρίου<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Εργαστήριο Φυσικής Ακουστικής και Οπτοακουστικής, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, Ε. Δασκαλάκη Περιβόλια, 74133, Ρέθυμνο  
\*sbrezas@hmu.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη μέθοδος για τον προσδιορισμό των δονητικών χαρακτηριστικών μουσικών οργάνων ή μερών τους. Η μέθοδος περιλαμβάνει μετρήσεις για τον προσδιορισμό της συχνοτικής απόκρισης, ολογραφική απεικόνιση των τρόπων ταλάντωσης, μοντελοποίηση FEM και προσομοιώσεις. Οι παράμετροι FEM επαληθεύονται μέσω ενός κριτηρίου συσχέτισης. Τα υπό εξέταση μουσικά όργανα και μέρη αρχικά προσομοιώνονται, στη συνέχεια εκτυπώνονται χρησιμοποιώντας πολυμερή υλικά και μετρούνται. Η δονητική απόκριση δύο τρισδιάστατα εκτυπωμένων κυμβάλων και τριών καπακιών τζουρά, μετρούνται πειραματικά και προσομοιώνονται υπολογιστικά. Τα εκτυπωμένα αντικείμενα διαφέρουν ως προς το υλικό, τη γεωμετρία και το πάχος. Οι αλλαγές στη γεωμετρία χρησιμοποιούνται για την περαιτέρω μελέτη της συχνοτικής απόκρισης και οι τρόποι ταλάντωσης επίσης παρουσιάζονται και μελετώνται. Από τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτουν παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση FEM και τις αντίστοιχες προσομοιώσεις. Η συσχέτιση μεταξύ μετρήσεων και μοντελοποίησης πραγματοποιείται με τη χρήση ενός κριτηρίου συσχέτισης. Το τελευταίο χρησιμοποιείται επίσης και για την ποσοτικοποίηση των μεταβολών της γεωμετρίας και του πάχους.

## ***Vibration analysis of cymbals and Tzouras top plates***

### **ABSTRACT**

*In this paper, an integrated method for the determination of the vibration characteristics of musical instruments or their parts is presented. The method includes modal measurements, holographic visualization of vibration modes, FEM modelling and simulations. The FEM parameters are verified by a correlation criterion. The musical instruments and parts under consideration are first simulated,*

*then printed using polymer materials and measured. The vibration response of two 3D printed cymbals and three Tzouras top plates are experimentally measured and computationally simulated. The printed objects differ in material, geometry and thickness. The changes in geometry are used to further study the frequency response and the vibration modes are also presented and studied. From the experimental results, vibration parameters are derived and used for FEM modelling and related simulations. The correlation between measurements and modelling is performed using the the complex frequency domain assurance criterion. The latter is also used to quantify changes in geometry and thickness.*

## Εισαγωγή

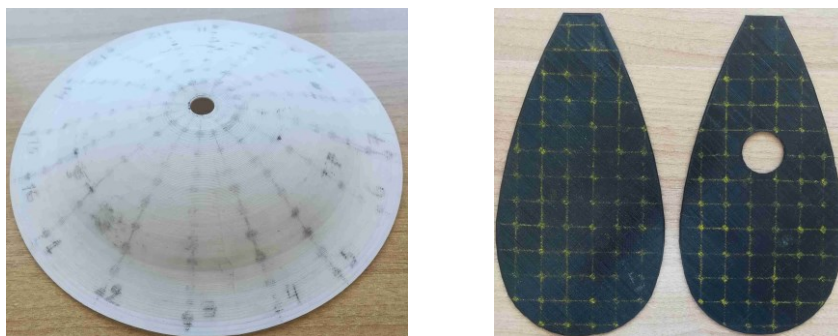
Η μουσική ακουστική αποτελεί έναν από τους τομείς της ακουστικής, ο οποίος προσελκύει συνεχώς το επιστημονικό ενδιαφέρον. Πλήθος μελετών αφορούν στα κρουστά, τα οποία συμπεριλαμβάνουν πολλά όργανα από όλο τον κόσμο. Οι κανονικοί τρόποι δόνησης κυμβάλων είναι το επίκεντρο ερευνών, στις οποίες χρησιμοποιείται μοντελοποίηση FEM για την πρόβλεψη των συντονισμών σε συνδυασμό με μετρήσεις ηλεκτρονικής συμβολομετρίας ψηφίδων (ESPI).

Η κατασκευή μουσικών οργάνων από σύνθετα ή εναλλακτικά υλικά έχει μεγάλη εφαρμογή και πραγματοποιείται με διάφορες μεθόδους [1]. Τα δονητικά χαρακτηριστικά των οργάνων ή μερών τους έχουν μεγάλη σημασία για τη μοντελοποίησή τους και προφανώς, για την ακουστική τους ποιότητα. Η επίδραση της απόσβεσης είναι μια σημαντική παράμετρος για τη δόνηση αντικειμένων και έχει μελετηθεί ευρέως. Για τον υπολογισμό της συσχέτισης μεταξύ της συχνοτικής απόκρισης μιας αρχικής και μιας τροποποιημένης κατάστασης, προτάθηκε η τροποποίηση μιας ήδη χρησιμοποιούμενης μεθόδου, η οποία εφαρμόστηκε στη μοντελοποίηση καπακιών κιθάρας [2]. Η παρούσα εργασία εξετάζει τη δονητική συμπεριφορά τρισδιάστατα εκτυπωμένων κυμβάλων και καπακιών τζουρά.

### 1. Μετρήσεις και μοντελοποίηση

Η παρούσα μεθοδολογία αποτελείται από τέσσερα μέρη. Στο πρώτο μέρος περιγράφονται μετρήσεις δονητικής απόκρισης και στο δεύτερο, δονητικές μετρήσεις με χρήση ολογραφικής μεθόδου με laser. Στο τρίτο μέρος παρουσιάζονται η μοντελοποίηση και η προσομοίωση με FEM, χρησιμοποιώντας εν μέρει ως αρχικές παραμέτρους, δεδομένα από τις μετρήσεις. Στο τελευταίο μέρος πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ αρχικών και τροποποιημένων καταστάσεων.

Για τις μετρήσεις εκτυπώθηκε ένα κύμβαλο από PLA διαμέτρου 8 ιντσών βάσει μετρήσεων των φυσικών διαστάσεων ενός πραγματικού κυμβάλου. Το μέσο πάχος του κυμβάλου είναι ~1,2 mm, όπως μετρήθηκε με ψηφιακό παχύμετρο. Για την αξιολόγηση της διαδικασίας, εκτυπώθηκε το ίδιο μοντέλο αυξάνοντας το πάχος του κατά 2,5 φορές. Επιπλέον, εκτυπώθηκαν τρία καπάκια τζουρά από PETG, χρησιμοποιώντας επίσης μετρήσεις των διαστάσεων ενός πραγματικού καπακιού. Τα τρία καπάκια έχουν όμοιες διαστάσεις, πλην του πάχους (δύο πάχους 2,4 mm και ένα πάχους 3 mm). Το ένα καπάκι των 2,4 χιλιοστών διαθέτει οπή, ενώ τα άλλα δύο όχι. Κατά την εκτύπωση των καπακιών οι ρυθμίσεις του εκτυπωτή ήταν ίδιες. Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται ένα κύμβαλο και δύο καπάκια τζουρά, χωρίς και με οπή.



Σχήμα 1.1 Εκτυπωμένο κύμβαλο (αριστερά) και καπάκια τζουρά (δεξιά).

### 1.1 Μετρήσεις συχνοτικής απόκρισης

Η κρουστική απόκριση του υπό εξέταση αντικείμενου υπολογίζεται με τη χρήση ενός κρουστικού σφυριού ανάδρασης μικρής μάζας (PCB, μοντέλο 086E80). Η προκαλούμενη ταλάντωση ανιχνεύεται από ένα μικρής μάζας επιταχυνσιόμετρο (PCB, μοντέλο TLD352A56). Τα δύο σήματα καταγράφονται και επεξεργάζονται περαιτέρω από έναν αναλυτή σήματος (OROS, μοντέλο OR34). Η συνάρτηση της συχνοτικής απόκρισης δίνεται με βάση την ποσότητα  $H_2$ , χρησιμοποιώντας τον λόγο:

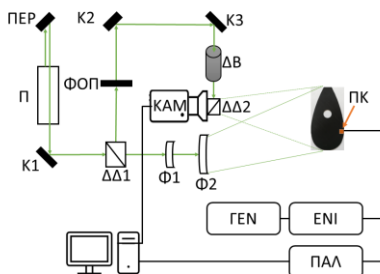
$$H_2(\omega) = \frac{G_{aa}(\omega)}{G_{Fa}(\omega)} \quad (1)$$

όπου  $G_{aa}(\omega)$  είναι το αυτοφάσμα της επιτάχυνσης και  $G_{Fa}(\omega)$  το ετεροφάσμα μεταξύ των σημάτων δύναμης και επιτάχυνσης. Η συχνοτική ανάλυση είναι 0,5 Hz με ανώτατο όριο συχνότητας τα 3200 Hz.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε πλέγμα σημείων. Για το κύμβαλο το πλέγμα αποτελείται από 144 σημεία (16 ακτίνες, με 9 σημεία κατά μήκος κάθε ακτίνας ανά 1 cm), ενώ για τον τζουρά τα σημεία του πλέγματος απέχουν μεταξύ τους 2 cm. Ο αριθμός των σημείων για τις πλάκες χωρίς οπή είναι 64, ενώ για την πλάκα με οπή τα σημεία είναι 62.

### 1.2 Απεικόνιση κανονικών τρόπων δόνησης

Η απεικόνιση των κανονικών τρόπων δόνησης πραγματοποιείται με τη χρήση της τεχνικής ESPI, μιας ολογραφικής μεθόδου με χρήση λέιζερ [3]. Η διάταξη ESPI παρουσιάζεται στο σχήμα 1.2. Κατά την υλοποίηση της ESPI το υπό εξέταση αντικείμενο φωτίζεται από μια δέσμη, η οποία αποτελεί τον ένα βραχίονα μιας αρχικής δέσμης. Ο δεύτερος βραχίονας ακολουθεί σταθερή πορεία, μέχρι τη συμβολή του με την ανακλώμενη δέσμη από το υπό εξέταση αντικείμενο. Περισσότερες πληροφορίες, ο αναγνώστης μπορεί να αντλήσει από την πηγή [3].



Σχήμα 1.2 Σχηματική απεικόνιση της διάταξης ESPI.

### 1.3 Μοντελοποίηση FEM και προσομοιώσεις

Για την προσέγγιση της γεωμετρίας του κυμβάλου σχεδιάστηκε το αξονοσυμμετρικό προφίλ στο επίπεδο XZ και περιστράφηκε γύρω από τον άξονα Z [4]. Το κύμβαλο έχει ακτίνα 101,6 mm και ύψος 28 mm, με ακτίνα του επιπέδου στήριξης (συμπεριλαμβανομένης της οπής) 16 mm. Στους κόμβους που περιβάλλουν την κεντρική οπή εφαρμόστηκε περιορισμός πάκτωσης για την προσομοίωση της στήριξης που εφαρμόστηκε κατά τις μετρήσεις. Το πάχος του κυμβάλου μετρήθηκε και βρέθηκε ότι κυμαίνεται από 1,0 mm έως 1,2 mm. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το μοντέλο με πάχος 1,0 mm παρουσιάζει μεγαλύτερη συμφωνία με τα πειραματικά ευρήματα και χρησιμοποιήθηκε στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται.

Κατά αντιστοιχία, δημιουργήθηκε το τρισδιάστατο μοντέλο CAD του καπακιού ενός πραγματικού τζουρά. Το συνολικό μήκος του καπακιού είναι 260 mm, ενώ το πάχος είναι 2,4 mm. Αναπτύχθηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα, ένα χωρίς και ένα με οπή, για να μελετηθεί η επίδραση της οπής στη δονητική συμπεριφορά. Οι αναλύσεις FEM των τρόπων ταλάντωσης και της συχνοτικής ανάλυσης πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.

Πρέπει να σημειωθεί ότι και στις δύο περιπτώσεις (κύμβαλο και τζούρας), ο συντελεστής απόσβεσης εξήχθη από τις μετρήσεις συχνοτικής απόκρισης που περιγράφονται στην ενότητα 1.1, χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση modalfit του Matlab. Για κάθε υλικό χρησιμοποιείται ένας μόνο λόγος απόσβεσης, δηλαδή η μέση τιμή της ανάλυσης modalfit.

### 1.4 Κριτήριο συσχέτισης

Ο Perez [2] εισήγαγε το μιγαδικό κριτήριο διασφάλισης στο πεδίο της συχνότητας (Complex Frequency Domain Assurance Criterion - CFDAC) για τη σύγκριση συχνοτικών αποκρίσεων μεταξύ δύο διαφορετικών καταστάσεων, μίας αρχικής (συμβολίζεται με  $p$ ) και μίας τροποποιημένης (συμβολίζεται με  $a$ ). Το CFDAC περιγράφεται ως εξής:

$$\text{CFDAC}_{fg} = \frac{\left[ \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N h_{pq}^{(p)}(\omega_f) h_{pq}^{(a)}(\omega_g) \right]^2}{\left[ \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N h_{pq}^{(p)}(\omega_f) h_{pq}^{*(p)}(\omega_f) \right] \left[ \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N h_{pq}^{(a)}(\omega_g) h_{pq}^{*(a)}(\omega_g) \right]} \in \mathbb{C} \quad (2)$$

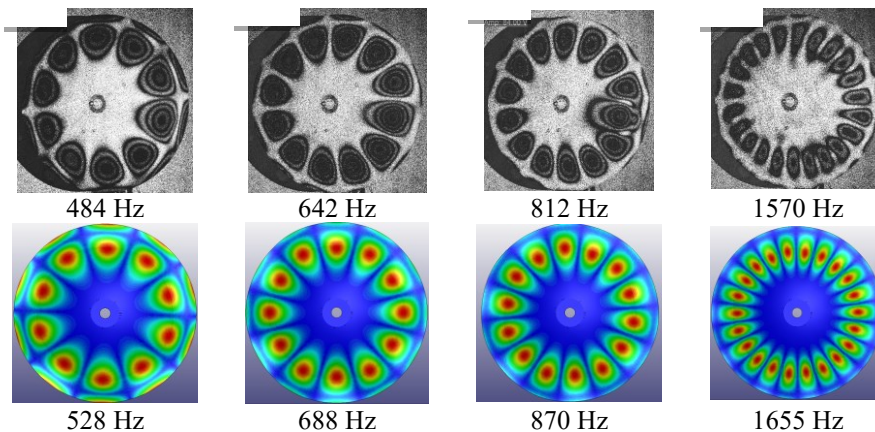
όπου  $h_{pq}^{(p)}(\omega_f)$  είναι η συνάρτηση συχνοτικής απόκρισης της αρχικής κατάστασης μετά από διέγερση στο σημείο  $p$  και ανίχνευση της απόκρισης στο σημείο  $q$  για συχνότητα  $f$ ,  $h_{pq}^{(a)}(\omega_g)$  είναι η συνάρτηση συχνοτικής απόκρισης της τροποποιημένης κατάστασης μετά από διέγερση στο σημείο  $p$  και ανίχνευση της απόκρισης στο σημείο  $q$  για συχνότητα  $g$ . Ο αστερίσκος στον παρονομαστή σημαίνει συζυγής μιγαδικός.

Κατά τη σύγκριση δύο ταυτόσημων καταστάσεων (π.χ. αρχική-αρχική), το γράφημα CFDAC παρουσιάζει διαγώνια συμμετρία, η οποία αποκλίνει κατά τη σύγκριση μη ταυτόσημων καταστάσεων (αρχική-τροποποιημένη).

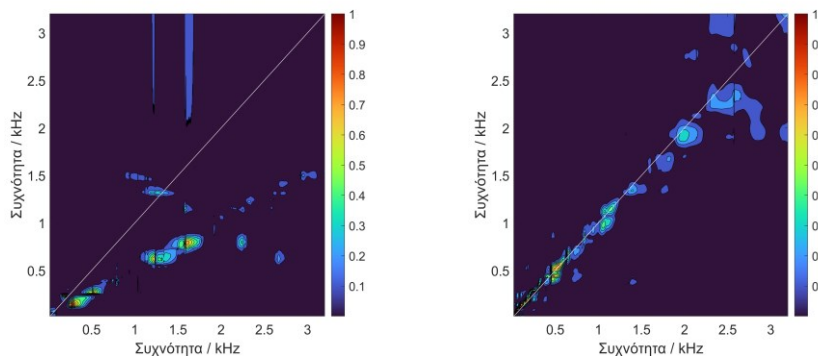
## 2. Αποτελέσματα

Αρχικά, οι μετρήσεις με το κρουστικό σφυρί και το επιταχυνσιόμετρο χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του λόγου απόσβεσης. Ο λόγος χρησιμοποιείται ως δεδομένο εισόδου στα μοντέλα FEM, από τα οποία προκύπτουν συναρτήσεις συχνοτικής απόκρισης και οι αντίστοιχοι τρόποι δόνησης. Για κάθε μοντέλο FEM, το πλέγμα σημείων που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των συχνοτικών αποκρίσεων είναι όμοιο με το πλέγμα σημείων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Η αξιολόγηση του μοντέλου FEM πραγματοποιείται με δύο τρόπους. Πρώτον, οι τρόποι δόνησης κατά FEM συγκρίνονται με τους τρόπους δόνησης που καταγράφονται από τις μετρήσεις ESPI. Δεύτερον, οι συχνοτικές αποκρίσεις που υπολογίζονται από τα μοντέλα FEM χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του κριτηρίου CFDAC. Σε αυτή την περίπτωση, τα αποτελέσματα των μετρήσεων θεωρείται ότι αντιστοιχούν στην αρχική κατάσταση, ενώ τα αποτελέσματα της ανάλυσης FEM στην τροποποιημένη κατάσταση.

Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζονται τέσσερις αντιπροσωπευτικοί τρόποι ταλάντωσης μετά από μετρήσεις με την τεχνική ESPI και μετά από μοντελοποίηση FEM (πάχος 1,0 mm) για το μικρού πάχους κύμβαλο PLA. Το μέγιστο ποσοστιαίο σφάλμα μεταξύ των μετρούμενων και των μοντελοποιημένων συντονισμών του σχήματος 3 είναι 9,8 %. Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζεται το πλάτος του μιγαδικού CFDAC μετά τη σύγκριση των συχνοτικών αποκρίσεων των μετρήσεων με αυτές της μοντελοποίησης FEM. Τα σχήματα 2.1 και 2.2 αποκαλύπτουν ότι, αν και το μοντέλο FEM προβλέπει τους τρόπους ταλάντωσης που απεικονίζονται από την ESPI, τα αποτελέσματα του μοντέλου FEM μπορούν να βελτιωθούν περαιτέρω, ώστε η κατανομή των τιμών του CFDAC να πλησιάσει εγγύτερα την κύρια διαγώνιο. Οι παρατηρούμενες αποκλίσεις αποδίδονται κυρίως στη χρησιμοποιηθείσα γεωμετρία CAD του μοντέλου FEM που μπορεί να τροποποιηθεί, χρησιμοποιώντας γραμμές για την προσομοίωση της μη ομαλής καμπυλότητας αντί τόξων.



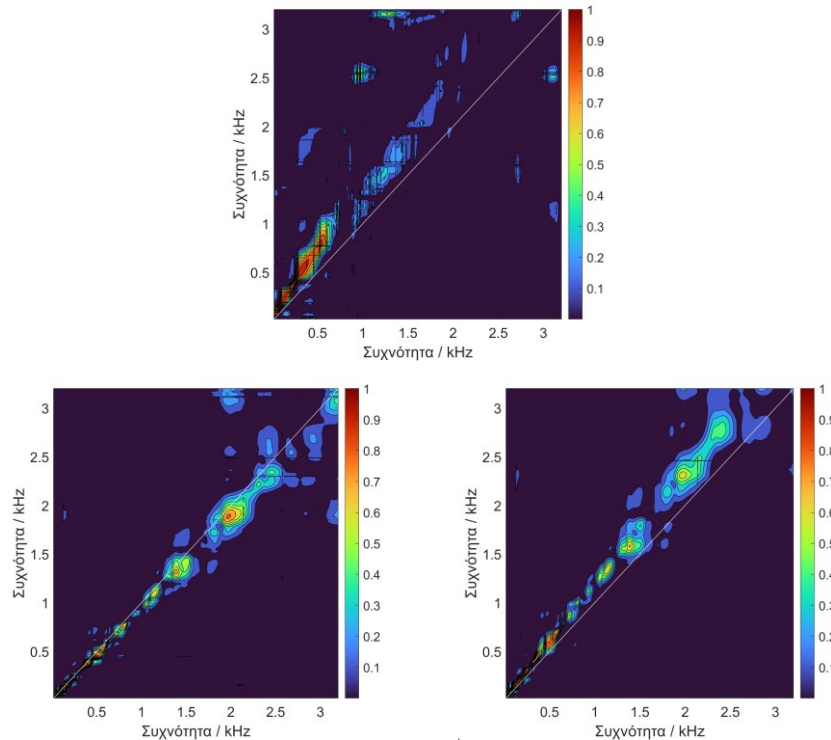
Σχήμα 2.1 Τρόποι δόνησης του μικρού πάχους κυβάλου κατά την εφαρμογή της τεχνικής ESPI (πάνω) και κατά μοντελοποίηση FEM (κάτω).



Σχήμα 2.2 Αριστερά: πλάτος του κριτηρίου CFDAC μεταξύ του μικρού πάχους κυβάλου από PLA (συχνοτικές αποκρίσεις κατόπιν μετρήσεων) και του ίδιου κυβάλου μετά από FEM προσομοίωση. Δεξιά: πλάτος του κριτηρίου CFDAC μεταξύ του άνευ καπακιού τζουρά από PETG (συχνοτικές αποκρίσεις κατόπιν μετρήσεων) και του ίδιου καπακιού μετά από FEM προσομοίωση.

Παρόμοια ανάλυση πραγματοποιείται για το καπάκι του τζουρά χωρίς σπή. Στο δεξί μέρος του σχήματος 2.2 παρουσιάζεται η κατανομή του κριτηρίου CFDAC. Κατά τη σύγκριση, προκύπτει ότι το μέγιστο ποσοστιαίο σφάλμα μεταξύ των μετρούμενων και των υπολογισμένων συντονισμών είναι 3,7%. Κατά τη σύγκριση των εικόνων του σχήματος 2.2 όσον αφορά την απόκλιση από την κύρια διαγώνιο, προκύπτει ότι το μοντέλο FEM του καπακιού του τζουρά δίδει αποτελέσματα με μικρή απόκλιση στα μετρούμενα.

Το κριτήριο CFDAC χρησιμοποιείται επίσης για τη σύγκριση των δύο τρισδιάστατα εκτυπωμένων κυβάλων (μικρού και μεγάλου πάχους) και των πλακών τζουρά. Πιο συγκεκριμένα, μεταξύ των πλακών με και χωρίς ηχητική σπή (ίδιου πάχους) και μεταξύ των πλακών με διαφορετικό πάχος (2,4mm και 3mm). Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζονται τα γραφήματα CFDAC.



Σχήμα 2.3 Πλάτος του κριτηρίου CFDAC μεταξύ PLA κυμβάλων διαφορετικού πάχους (πάνω), and PETG καπακιών τζουρά με και χωρίς οπή (κάτω αριστερά) και μεταξύ καπακιών διαφορετικού πάχους (κάτω δεξιά).

Η διάνοιξη της ηχητικής οπής έχει ως αποτέλεσμα την απόκλιση από την κύρια διαγώνιο σε συχνότητες άνω του 1 kHz. Η απόκλιση είναι προς τη δεξιά πλευρά, λόγω της μείωσης της συχνότητας των συντονισμών του καπακιού με την οπή. Αντιθέτως, η μείωση της ελαστικότητας του καπακιού με την αύξηση του πάχους, μετατοπίζει τους συντονισμούς σε υψηλότερες συχνότητες και κατά συνέπεια, τις τιμές του κριτηρίου CFDAC άνω από την κύρια διαγώνιο. Η αύξηση του πάχους του κυμβάλου έχει παρόμοια αποτελέσματα στο αντίστοιχο γράφημα CFDAC. Το μεγάλο πάχος κύμβαλο παρουσιάζει διακριτές κορυφές συντονισμού πάνω από τα 1,5 kHz, οι οποίες σχετίζονται με τις περιοχές στο γράφημα CFDAC περίπου στα (1 kHz, 2,5 kHz) και (1,5 kHz, 3,1 kHz), όπου η πρώτη τιμή της παρένθεσης είναι η συχνότητα στον άξονα x και η δεύτερη τιμή στον άξονα y.

### 3. Συμπεράσματα

Η εργασία περιγράφει μια ολοκληρωμένη μέθοδο για τη μέτρηση και την ανάλυση των δονητικών χαρακτηριστικών τρισδιάστατα εκτυπωμένων μουσικών

οργάνων ή/και τμημάτων τους. Μελετώνται δύο κύμβαλα κατασκευασμένα από PLA και τρία καπάκια τζουρά κατασκευασμένα από PETG. Η συνάρτηση συχνοτικής απόκρισης μετράται με την τεχνική του μετακινούμενου κρουστικού σφυριού (roving hammer) και τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του λόγου απόσβεσης των υλικών. Αυτός με τη σειρά του χρησιμοποιείται ως αρχική παράμετρος σε μοντελοποίηση και προσομοίωση FEM, η οποία παρέχει τις αντίστοιχες συχνοτικές αποκρίσεις και τους τρόπους δόνησης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα μετρούμενα. Εφαρμόζονται δύο μέθοδοι σύγκρισης. Πρώτον, οι τρόποι δόνησης μετά από μετρήσεις ESPI χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση των συχνοτήτων συντονισμού. Δεύτερον, υπολογίζεται η συσχέτιση μεταξύ των μετρούμενων συχνοτικών αποκρίσεων και των αποκρίσεων μετά τη μοντελοποίηση με FEM χρησιμοποιώντας το κριτήριο CFDAC. Τα αποτελέσματα της FEM δείχνουν ότι και στην περίπτωση του κυμβάλου και των πλακών του τζουρά, οι τρόποι δόνησης αντιστοιχούν στους μετρούμενους. Οι τιμές του κριτηρίου CFDAC δείχνουν ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του κυμβάλου μπορούν να βελτιωθούν περαιτέρω. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του τζουρά είναι πιο κοντά στα πειραματικά αποτελέσματα του εκτυπωμένου καπακιού. Το κριτήριο CFDAC μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για τον εντοπισμό διαφορών μεταξύ καταστάσεων κατά την κατασκευή μουσικών οργάνων, όπως αλλαγές στο πάχος και στα ανοίγματα οπών.

#### 4. Ευχαριστίες

Η παρούσα έρευνα χρηματοδοτήθηκε από το Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, στο πλαίσιο του έργου «Καταγραφή και μετρολογική ανάλυση των δονητικο-ακουστικών χαρακτηριστικών μουσικών οργάνων για τη διερεύνηση εναλλακτικών και χαμηλού κόστους υλικών και γεωμετριών με συναφή ηχητικά χαρακτηριστικά». Ευχαριστούμε για την υποστήριξη με υπολογιστικό χρόνο που χορηγήθηκε από το Ελληνικό Δίκτυο Έρευνας και Τεχνολογίας (GRNET) στην Εθνική εγκατάσταση HPC ARIS-στο πλαίσιο του έργου pr016025-LaMPIOS III.

#### 5. Αναφορές

[1] S. Brezas et al. «Review of manufacturing processes and vibro-acoustic assessments of composite and alternative materials for musical instruments» *Applied Sciences*, **14**, 2293 (2024)

[2] R. Viala et al. «Towards model-based approaches for musical instruments making: validation of the model of a Spanish guitar soundboard and characterization features proposal» *Applied Acoustics*, **172**, 107591 (2021)

[3] E. Bakarezos et al. *Laser-Based Interferometric Techniques for the Study of Musical Instruments*, Springer Cham (2019)

[4] S. Brezas et al. «Vibrational analysis of a splash cymbal by experimental measurements and parametric CAD-FEM simulations» *Vibration*, **7**, 146-160, (2024)