

## **Διερεύνηση δονητικής συμπεριφοράς παραδοσιακού ξύλινου και εκτυπωμένου τζουρά**

Μάρκος Κατσίπης<sup>1</sup>, Ορέστης Μιχαηλίδης<sup>1</sup>, Αθανάσιος Σκουτέλης<sup>1</sup>, Γεώργιος Σκουτέλης<sup>1</sup>, Σπύρος Μπρέζας<sup>1</sup>, Ιωάννης Ορφανός<sup>1</sup>, Νεκτάριος Παπαδογιάννης<sup>1</sup>,  
Μάκης Μπακαρέζος<sup>1</sup>, Βασίλης Δημητρίου<sup>1</sup>, Ευάγγελος Κασελούρης<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Εργαστήριο Φυσικής Ακουστικής και Οπτοακουστικής, Τμήμα Μουσικής  
Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, 74133  
Περιβόλια, Ρέθυμνο

\*vagfem@hmu.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρούσα μελέτη πραγματοποιείται τη μελέτη της δονητικής συμπεριφοράς παραδοσιακού και 3d-εκτυπωμένου τζουρά μέσω υπολογιστικών προσομοιώσεων και πειραματικών μετρήσεων. Το τρισδιάστατο μοντέλο ενός παραδοσιακά κατασκευασμένου έγχορδου τζουρά δημιουργείται με τη χρήση λογισμικού τρισδιάστατης υπολογιστικής σχεδίασης. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση και προσομοίωση της δονητικής συμπεριφοράς του οργάνου, που αποτελείται από το καπάκι, τον καβαλάρη, τα καμάρια και το σκάφος. Υλοποιούνται επίσης προσομοιώσεις ανάλυσης ιδιοσυχνοτήτων, μόνο στο καπάκι του οργάνου, με οριακές συνθήκες που ανταποκρίνονται στις πειραματικές μετρήσεις. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με πειραματικές μετρήσεις εκτελούμενες με τη μέθοδο της χρονικά ολοκληρωμένης ψηφιακής ολογραφίας κοκκίδων – ESPI, τόσο στο καπάκι αλλά και σε ολόκληρο το συναρμολόγημα του τζουρά. Ακολούθως, πραγματοποιούνται υπολογιστικές προσομοιώσεις, με αντικατάσταση των ξύλινων τμημάτων από πολυμερή (PETG) που ενδείκνυνται για τρισδιάστατη εκτύπωση. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα της δονητικής ανάλυσης που λήφθηκαν για το παραδοσιακό ξύλινο όργανο. Αυτή η μελέτη είναι κρίσιμη στη θεμελίωση της κατασκευής μουσικών οργάνων από εναλλακτικά υλικά, με υψηλή βιωσιμότητα, ανθεκτικότητα και προδιαγεγραμμένες ακουστικές ιδιότητες, λιγότερο επηρεαζόμενες από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία και η υγρασία.

### **Study of the vibrational behavior of traditional – wooden and 3d printed tzouras**

Markos Katsipis<sup>1</sup>, Orestis Michaelides<sup>1</sup>, Athanasios Skoutelis<sup>1</sup>, Georgios Skoutelis<sup>1</sup>,  
Spyros Brezas<sup>1</sup>, Ioannis Orphanos<sup>1</sup>, Nektarios Papadogiannis<sup>1</sup>, Makis Bakarezos<sup>1</sup>,  
Vasilis Dimitriou<sup>1</sup>, Evaggelos Kaselouris<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Acoustics and Optoacoustics, Department of music technology and  
Acoustics, Hellenic Mediterranean University, 74133 Perivolia, Rethymno

\*vagfem@hmu.gr

## ABSTRACT

*The present study deals with the study of the vibrational behavior of traditional and 3d-printed Tzouras by means of computer simulations and experimental measurements. The 3D model of the traditional stringed instrument is created using 3D computer aided design software. The finite element method is used to model and simulate the vibrational behavior of the instrument, which consists of the top plate, the bridge, the bars and the main body. Simulations of modal analysis are also performed, only on the top plate of the instrument, with boundary conditions corresponding to the experimental measurements. The results are compared with experimental measurements performed with the electro-speckle interferometry – ESPI method, both on the top plate and on the whole assembly of tzouras. Next, finite element simulations are carried out, with the replacement of the wooden parts by polymers (PETG), suitable for 3D printing. The results are compared with those of the vibrational analysis obtained from the traditional wooden instrument. This study is essential in the foundation of the construction of musical instruments from alternative materials, with high sustainability, durability and prescribed acoustic properties, less affected by environmental factors such as temperature and humidity.*

## Εισαγωγή

Η μουσική και τα μουσικά όργανα είναι μέρος της πολιτιστικής κληρονομιάς του ανθρώπου για χιλιάδες χρόνια. Η παραδοσιακή κατασκευή των οργάνων γίνεται από υλικά όπως δέρμα, μέταλλο και ξύλο. Το σώμα των έγχορδων μουσικών οργάνων γίνεται συνήθως από ξύλο. Τα ξύλινα μουσικά όργανα επηρεάζονται έντονα από παράγοντες όπως υγρασία και θερμοκρασία με απρόβλεπτο τρόπο, επηρεάζοντας την απόδοσή τους. Η χρήση του ξύλου έχει επίσης οικολογικό αντίκτυπο, επιβάλλοντας περαιτέρω περιορισμούς, ειδικά όταν επιλέγονται περιζήτητα και σπάνια είδη δέντρων. Η ανάπτυξη και χρήση νέων και εναλλακτικών υλικών έχει δημιουργήσει καινούργιες δυνατότητες στην κατασκευή μουσικών οργάνων. Τα σύνθετα ή εναλλακτικά υλικά είναι πολύ λιγότερο επιρρεπή σε περιβαλλοντικές αλλαγές. Η χρήση τους εξασφαλίζει πιο εύκολη και ελέγξιμη διαδικασία κατασκευής. Η ανθεκτικότητα των εναλλακτικών υλικών είναι υψηλή, επιτρέποντάς τους να χρησιμοποιούνται για μουσικά όργανα, όπου εφαρμόζονται υψηλές τάσεις, και ταυτόχρονα είναι ελαφριά, παρέχοντας έτσι άνεση και καλύτερη αναπαραγωγή στον ερμηνευτή. Στις μέρες μας, εκτός από οργανοποιούς και επιστήμονες, τα μουσικά όργανα από εναλλακτικά υλικά είναι αποδεκτά και από τους περισσότερους ερμηνευτές [1,2]. Τέτοια υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί και για την κατασκευή παραδοσιακών μουσικών οργάνων, ωστόσο, σε πολύ περιορισμένο βαθμό.

Στη βιβλιογραφία, αρκετοί συγγραφείς έχουν μελετήσει τη δονητική συμπεριφορά των μουσικών οργάνων χρησιμοποιώντας πειραματικές μετρήσεις και αριθμητικές προσομοιώσεις. Στην [3], η δονητική συμπεριφορά μιας βιόλα ντα γκάμπα μελετήθηκε μέσω της ηλεκτρονικής συμβολομετρίας κοκκίδων (ESPI) και προσομοιώσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Η δονητική ανάλυση του σετάρ, ενός περσικού λαούτου με μακρύ λαιμό, μελετήθηκε [4] μέσω ενός συνδυασμού πειραμάτων με κρουστικό σφυρί ανάδρασης και δονόμετρο Laser

Doppler, και προσομοιώσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Για τον πλήρη χαρακτηρισμό των μουσικών οργάνων, αναπτύξαμε μια ολοκληρωμένη μέθοδο [5], η οποία συνδυάζει μετρήσεις ESPI, μετρήσεις κρουστικής απόκρισης, μοντελοποίηση και προσομοιώσεις με FEM. Εδώ, παρουσιάζουμε την εφαρμογή αυτής της μεθόδου και τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τη δονητική αξιολόγηση ενός ξύλινου τζουρά, ξύλινων και εκτυπωμένων καπακιών τζουρά. Ένας παραδοσιακός ξύλινος τζουράς και ξύλινα καπάκια τζουρά (χρησιμοποιήθηκαν ως αναφορά) κατασκευάστηκαν και αξιολογήθηκαν με πειραματικές μετρήσεις ESPI. Με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τα χαρακτηριστικά του οργάνου αναφοράς, δημιουργήθηκε τρισδιάστατο σχέδιο CAD και κατασκευάστηκαν εκτυπωμένα καπάκια τζουρά από PETG, τα οποία αξιολογήθηκαν επίσης με ESPI.

Δημιουργήθηκε μοντέλο FEM για τα ξύλινα καπάκια με τα κολλημένα καμάρια τους, το ολοκληρωμένο σώμα του τζουρά και τα εκτυπωμένα καπάκια από PETG. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, ανάλυσης ιδιοσυχνοτήτων με FEM, ήταν σε καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα της ESPI. Τα μοντέλα CAD-FEM επιτρέπουν τροποποιήσεις των παραμέτρων του μουσικού οργάνου, όπως τις ιδιότητες του εναλλακτικού υλικού καθώς και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του. Ως εκ τούτου, η διαδικασία κατασκευής και η δονητική συμπεριφορά του τζουρά μπορούν να βελτιστοποιηθούν μέσω της προτεινόμενης ολοκληρωμένης μεθόδου.

## 1. Κατασκευή

### 1.1 Κατασκευή ξύλινου μουσικού οργάνου

Ο τζουράς είναι ελληνικό έγχορδο μουσικό όργανο, αχλαδόσχημου σώματος, μικρογραφία του μπουζουκιού και περίπου διπλάσιο από το μπαγλαμά. Κατασκευάζεται από τα ίδια υλικά και με παρόμοιες τεχνικές με το μπουζούκι και ανήκει στα έγχορδα λαϊκά όργανα της οικογένειας των λαούτων. Το σώμα του ξύλινου οργάνου που μελετήθηκε είναι σκαφτό από ένα ενιαίο κομμάτι καρυδιάς. Τα ξύλα που χρησιμοποιεί στο εργαστήριο ο οργανοποιός είναι παλιά και με πολλή καλή απόκριση στον ήχο. Τα υπόλοιπα μέρη του οργάνου κατασκευάστηκαν από διαφορετικά είδη ξύλων. Τα διαφορετικά κομμάτια ξύλου διαμορφώνονταν και ενώνονταν σταδιακά με κόλλα σε συνθέσεις – τμήματα του οργάνου. Κάθε φορά που ένα τμήμα του οργάνου προστιθόταν σε κάποιο άλλο τμήμα του οργάνου, ξαναδιαμορφωνόταν ώστε να ετοιμαστεί για το επόμενο βήμα της σύνθεσης. Οι ενώσεις με ψαρόκολλα χρειάζονται ημέρες και για αυτό η κατασκευή δεν είναι γραμμική αλλά με παράλληλες εργασίες μέχρι να τελειώσει το όργανο. Επιγραμματικά αναφέρονται τα στάδια κατασκευής του οργάνου: η δημιουργία σκάφους (καρυδιά) με σκαφτό τρόπο, η κατασκευή μάνικου με τρία ξύλα από σφένδαμο και καρυδιά, η κατασκευή του καπακιού με ξύλο έλατου και καμάρια (δοκαράκια υποστήριξης του καπακιού) από πεύκο, η προετοιμασία της ταστιέρας από έβενο, η δημιουργία μόρσου (χελιδονοουρά) στο σώμα του οργάνου, η εφαρμογή στο μάνικο με κλίση, το κάψιμο κόλλας, το τρίψιμο και δημιουργία τρύπας στο καπάκι, η χάραξη των τάσεων στην ταστιέρα, το τρίψιμο του σκάφους, η κόλληση με το καπάκι, η δημιουργία του καράουλου, ο στολισμός του σκάφους, η κόλληση της ταστιέρας, η μορφοποίηση του μάνικου και του καράουλου, η

διακόσμηση ταστιέρας με όστρακα, η τοποθέτηση των τάστων, το άνοιγμα τρυπών για τα κλειδιά, το λουστράρισμα του οργάνου και τέλος η αρμάτωση του οργάνου με τοποθέτηση κλειδιών, καβαλάρη, χορδιέρας και χορδών.

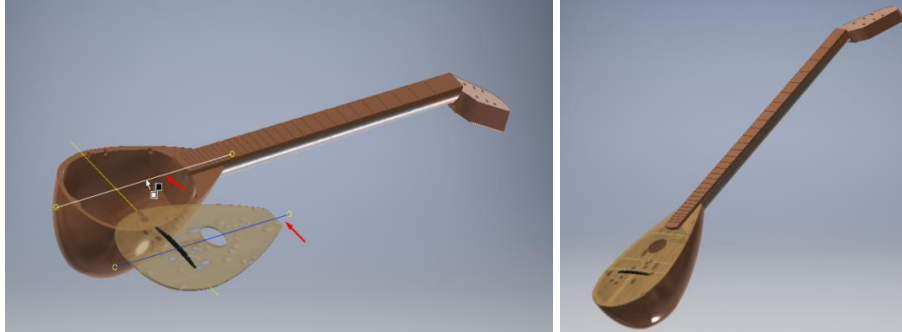


*Εικόνα 1.1 Ο τζουράς που κατασκευάστηκε*

Ακολούθησε η κατασκευή καπακιού ίδιου με αυτό του οργάνου, με ίδιες υποστηρίξεις - καμάρια κολλημένα πάνω του και με ίδια υλικά και πάχη.

### *1.2 Δημιουργία CAD γεωμετρίας*

Με βάση μετρήσεις πάνω στα διάφορα μέρη του τζουρά δημιουργήθηκαν τα βασικά δισδιάστατα σχέδια της γεωμετρίας του οργάνου από τα οποία προέκυψαν οι τρισδιάστατες μορφές των τμημάτων και ολόκληρου του οργάνου σε πρόγραμμα CAD. Από την κατασκευή part (τμημάτων) του οργάνου έγινε η σύνθεσή του σε πλήρες Assembly του καπακιού με τα καμάρια, τον καβαλάρη, το σκάφος και τα υπόλοιπα μέρη του τζουρά. Το βήμα αυτό είναι απαραίτητο για την ψηφιακή μοντελοποίηση του οργάνου, για λόγους καταγραφής και προσομοίωσης. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την αντιγραφή του οργάνου είναι απλή μέτρηση με χάρακα και παχύμετρο. Για αυτό υπήρχαν τμήματα του οργάνου με πολύπλοκη γεωμετρία που δεν ήταν δυνατό να καταγραφούν ακριβώς, όπως το σκαφτό σκάφος του τζουρά. Για να γίνει αυτό χρειάζεται 3D scan του μετρούμενου αντικειμένου και αντίστροφη μηχανική (reverse engineering), όπως έχει γίνει σε παλαιότερες εργασίες και είναι στα άμεσα σχέδια επόμενων εργασιών.



Εικόνα 1.2 Δημιουργία CAD γεωμετρίας τζουρά

### 1.3 Πειραματικές μετρήσεις

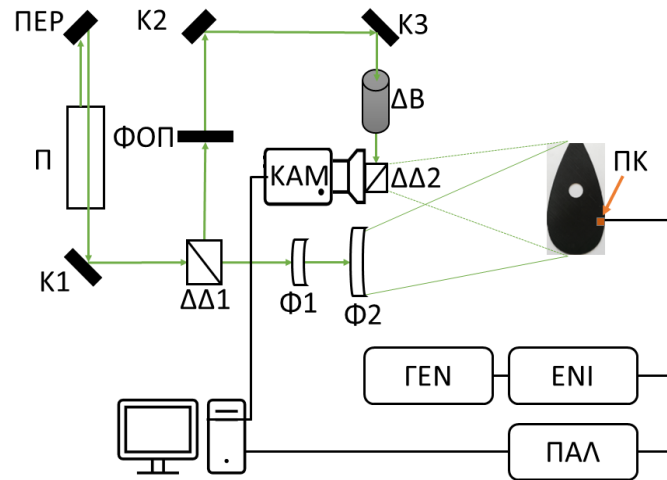
Στις εικόνες που ακολουθούν βλέπουμε το καπάκι από έλατο 2,4 mm με τα κολλημένα καμάρια από πεύκο και το σώμα του τζουρά, στις πειραματικές διατάξεις του εργαστηρίου Φυσικής Ακουστικής και Οπτοακουστικής στο Ρέθυμνο. Στο εργαστήριο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ESPI στο καπάκι και στο πλήρες όργανο.



Εικόνα 1.3 Βάση στήριξης για καπάκι με καμάρια (αριστερά) και για τζουρά (δεξιά)

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ιδιοσυχνοτήτων συγκρίνονται με πειραματικές μετρήσεις εκτελούμενες με τη μέθοδο της χρονικά ολοκληρωμένης ψηφιακής ολογραφίας κοκκίδων – ESPI, τόσο στο καπάκι αλλά και σε ολόκληρο το συναρμολόγημα του τζουρά. Η διάταξη της ESPI βασίζεται σε συνεχές laser μήκους κύματος 532 nm. Η κύρια δέσμη του laser διαχωρίζεται σε δύο με τη βοήθεια διαχωριστή και ειδικοί καθρέπτες τις ανακλούν. Σύστημα ειδικών φακών τοποθετείται στην εστία της πρώτης δέσμης (pump) και φωτίζει τον υπό μελέτη τζουρά στο πράσινο χρώμα του laser. Η δεύτερη δέσμη, καλούμενη ως δέσμη αναφοράς (probe), κατευθύνεται με καθρέπτες σε κάμερα που καταγράφει το είδωλο του φωτιζόμενου αντικειμένου και ταυτόχρονα καταγράφει και τη δέσμη αναφοράς. Η κάμερα είναι συνδεδεμένη με υπολογιστή στον οποίο γίνεται επεξεργασία της λαμβανόμενης εικόνας και απεικονίζεται το αποτέλεσμα της

δονητικής συμπεριφοράς του οργάνου. Ηχείο συνδεδεμένο με γεννήτρια ήχου ηχοβολεί στο επιθυμητό εύρος συχνοτήτων κατά τη διάρκεια των πειραμάτων το υπό μελέτη όργανο.



Εικόνα 1.4 Ολογραφική απεικόνιση με χρήση της ESPI [5]

#### 1.4 Μοντελοποίηση και FEM προσομοιώσεις

Η υπολογιστική προσομοίωση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με χρήση λογισμικού απαιτεί συγκεκριμένα στάδια. Το πρώτο είναι η δημιουργία της γεωμετρίας της κατασκευής σε πρόγραμμα CAD. Έπειτα ακολουθεί η δημιουργία του πλέγματος, με πεπερασμένα στοιχεία, του μοντέλου και η επιλογή του είδους της επίλυσης (π.χ. ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων, μηχανική ανάλυση, θερμική ανάλυση, θερμομηχανική ανάλυση). Αυτή η διαδικασία δύναται να γίνει σε πρόγραμμα υπολογιστή που αποκαλείται προ-επεξεργαστής (pre-processor). Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση, εισάγονται σε ένα πρόγραμμα το οποίο πραγματοποιεί την επίλυση του αριθμητικού προβλήματος (solver). Όταν τελειώσει η επίλυση τα αποτελέσματα δύναται να επεξεργαστούν από ένα πρόγραμμα, που αποκαλείται postprocessor, για να μπορέσει ο μελετητής να επεξεργαστεί τα αποτελέσματα. Περαιτέρω, οι πολύπλοκες δονήσεις των μουσικών οργάνων μπορούν να περιγραφούν με όρους κανονικών τρόπων δόνησης. Η ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων των μουσικών οργάνων είναι η μελέτη των δυναμικών ιδιοτήτων τους υπό δονητική διέγερση. Κάθε τρόπος δόνησης προσδιορίζεται από τρεις κύριες παραμέτρους, δηλαδή τη φυσική συχνότητα, το σχήμα του τρόπου λειτουργίας, ιδιομορφή, και τον παράγοντα απόσβεσης. Οποιοδήποτε μοτίβο παραμόρφωσης ενός μουσικού οργάνου εκφράζεται με συνδυασμό των ιδιομορφών. Η ιδιομορφή του τρόπου δόνησης είναι ένα μοτίβο που σχετίζεται με μια συγκεκριμένη φυσική συχνότητα και αντιπροσωπεύει τη σχετική μετατόπιση όλων των τμημάτων του οργάνου, σε διάφορες κατευθύνσεις, για αυτόν τον τρόπο δόνησης. Ο συντελεστής απόσβεσης

κάθε τρόπου λειτουργίας συνδέεται με τη φυσική του συχνότητα, ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογος με την κατανομή μάζας.

Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων των ξύλινων τμημάτων του καπακιού και του οργάνου, ώστε να γίνει ταύτιση της δονητικής συμπεριφοράς τους βάσει των μηχανικών τους ιδιοτήτων και απώτερο στόχο την αντικατάστασή τους από πολυμερή (όπως PETG), που ενδείκνυνται για τρισδιάστατη εκτύπωση. Η ψηφιακή τους ταύτιση και αντικατάσταση θα επιταχύνει την διαδικασία κατασκευής οργάνων με εναλλακτικά υλικά που έχουν παρόμοια δονητικά χαρακτηριστικά με το ξύλο.

Για την προσομοίωση του καπακιού με τα καμάρια το πλέγμα του FEM μοντέλο είχε εξαεδρικά στοιχεία 8 κόμβων και η διακριτοποίηση έγινε με 40000 στοιχεία. Οι οριακές συνθήκες του μοντέλου ήταν πάκτωση στο άνω και κάτω άκρο του καπακιού. Για την ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων FEM χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα LS-DYNA. Για την προσομοίωση του πλήρους σώματος του τζουρά η διακριτοποίηση του μοντέλου έγινε με 50000 στοιχεία. Οι οριακές συνθήκες του μοντέλου ήταν πάκτωση στο κέντρο της πλάτης του σκάφους και θεώρηση προέντασης στις χορδές 338 N για (τρίχορδο) τζουρά χορδισμένο Ρε, Λα, Ρε. Για την ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων FEM χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SolidWorks.

Από την βιβλιογραφία έγιναν δοκιμές διαφόρων υλικών ώστε να προσεγγιστεί η δονητική συμπεριφορά των ορθοτροπικών ξύλινων αντικειμένων. Η πιο πλούσια πηγή που έδωσε και την καλύτερη ταύτιση προσομοίωσης – πειράματος ήταν το Mechanical Properties of Wood από τον D. E. Kretschmann [6], ο οποίος έχει συλλέξει δεδομένα από ποικιλίες ξύλων που περιλαμβάνουν όλα τα μέτρα ελαστικότητας και διάτμησης καθώς και τους λόγους Poisson.

Πίνακας 1.1 Ιδιότητες ξύλου

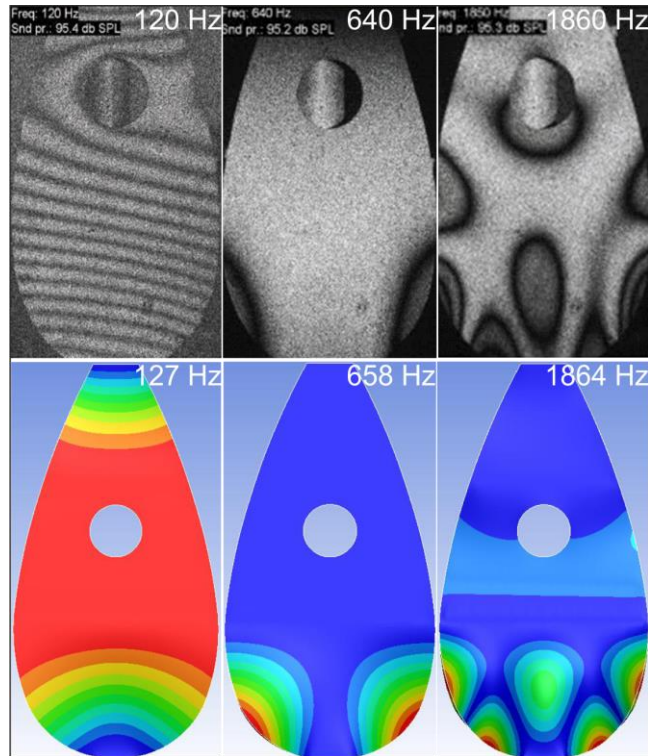
Υλικό	Ειδική βαρύτητα	EL	ET	ER	GLR	GLT	GRT
		GPa	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa
Spruce, Engelmann	0.35	8.9	0.53	1.14	1.10	1.07	0.09
Spruce, Sitka	0.4	10.8	0.46	0.84	0.69	0.66	0.03
Maple, red	0.54	11.3	0.76	1.58	1.50	0.84	0.24
Pine, white	0.35	10.1	0.39	0.79	0.53	0.49	0.05
Walnut, black	0.55	11.6	0.65	1.23	0.99	0.72	0.24
Ebony	0.96	15.5	1.15	1.64	0.97	0.96	0.37

μTR	μRL	μTL
0.255	0.083	0.058
0.245	0.04	0.025
0.354	0.063	0.044
0.334	0.026	0.013
0.367	0.052	0.036
0.450	0.033	0.056

Με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου του τζουρά σχεδιάστηκε επίσης καπάκι χωρίς τρύπα και καμάρια, πάχους 2.4 mm ώστε να μοντελοποιηθεί και να κατασκευαστεί από filament 3D printer και να γίνει ταύτιση των πειραματικών δεδομένων με το μοντέλο προσομοίωσης. Θεωρήθηκαν ιδιότητες υλικού PETG από τη βιβλιογραφία [7].

## 2. Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

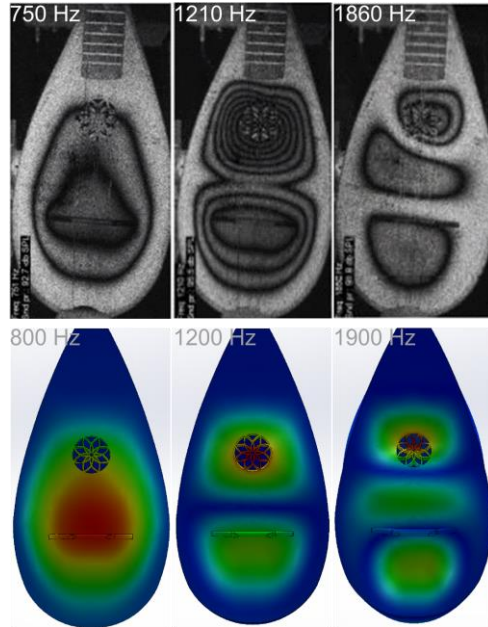
Υλοποιήθηκε η καταγραφή της δονητικής συμπεριφοράς του καπακιού και του οργάνου και η σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα των υπολογιστικών προσομοιώσεων σταδιακά, πρώτα στο καπάκι και έπειτα στο πλήρες σώμα. Αρχικά στην εικόνα 1.5 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά αποτελέσματα σύγκρισης τρόπων δόνησης μετρούμενων με την ESPI και υπολογισμένων με FEM προσομοιώσεις, όπου παρατηρείται καλή συμφωνία, για το μοντέλο καπάκι-καμάρια.



Εικόνα 1.5 Σύγκριση ESPI-FEM αποτελεσμάτων δονητικής ανάλυσης

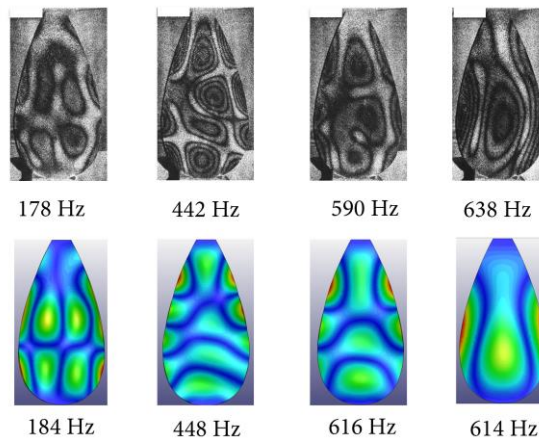
Στη συνέχεια στην εικόνα 1.6 επίσης παρουσιάζονται χαρακτηριστικά αποτελέσματα σύγκρισης τρόπων δόνησης μετρούμενων με την ESPI και υπολογισμένων με FEM προσομοιώσεις, όπου παρατηρείται καλή συμφωνία για το μοντέλο καπάκι-καμάρια-καβαλάρης-σκάφος.





Εικόνα 1.6 Σύγκριση ESPI-FEM αποτελεσμάτων δονητικής ανάλυσης

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των εικόνων 1.5 και 1.6 είναι προφανές και αναμενόμενο ότι οι ιδιομορφές είναι διαφορετικές λόγω των διαφορετικών οριακών συνθηκών αλλά και των τμημάτων του οργάνου που μελετώνται στις δονητικές αναλύσεις. Επιπλέον, στην εικόνα 1.7 παρουσιάζονται ομοίως αποτελέσματα ESPI-FEM ιδιομορφών για το εκτυπωμένο καπάκι χωρίς οπή και καμάρια, όπου επίσης παρατηρείται καλή συμφωνία. Τα αποτελέσματα του εκτυπωμένου καπακιού δείχνουν ότι οι συντονισμοί ξεκινούν σε χαμηλότερες συχνότητες σε σχέση με αυτές του ξύλινου καπακιού.



Εικόνα 1.7 Σύγκριση ESPI-FEM αποτελεσμάτων δονητικής ανάλυσης για εκτυπωμένο καπάκι

Συνολικά παρατηρούμε ικανοποιητική συμφωνία αποτελεσμάτων ολογραφικής απεικόνισης με αποτελέσματα FEM προσομοιώσεων για ορθοτροπικά και πολυμερή υλικά. Επίσης αναδείχθηκε ότι η χρήση σύγχρονων μεθόδων κατασκευής όπως η τρισδιάστατη εκτύπωση συμβάλει στην μελέτη και κατ'επέκταση στην κατασκευή μουσικών οργάνων. Στο μέλλον δύναται να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση ρευστού-στερεού στην υλοποίηση δονητικών ακουστικών προσομοιώσεων. Αποσκοπούμε σε κατασκευή μουσικού οργάνου με εύκολα εναλλάξιμα καπάκια ώστε να γίνει πιο εύκολη η έρευνα για τη χρήση εναλλακτικών υλικών στην κατασκευή του τζουρά με στόχο βελτιωμένη απόδοση και μείωση του χρόνου κατασκευής του οργάνου.

### 3. Ευχαριστίες

Ευχαριστούμε τον οργανοποιό Μάριο Τορναρίτη για τη βοήθεια στην κατασκευή του τζουρά. 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.

### 4. Αναφορές

- [1] S. Brezas et al. «Review of Manufacturing Processes and Vibro-Acoustic Assessments of Composite and Alternative Materials for Musical Instruments» *Appl. Sci.* **14**, pp 2293 (2024)
- [2] E. Kaselouris et al. «A review of finite element studies in string musical instruments» *Acoustics* **4**, pp 183-202 (2022)
- [3] V. Chatziioannou «Reconstruction of an early viola da gamba informed by physical modeling» *J. Acoust. Soc. Am.* **145**, 3435-3442 (2019)
- [4] H. Mansour «Modal Analysis of the Setar: A Numerical-Experimental Comparison» *J. Vib. Acoust. Trans. ASME* **137**, pp 61006 (2015)
- [5] S. Brezas et al. « An integrated method for the vibroacoustic evaluation of a carbon fiber bouzouki» *Appl. Sci.* **13**, pp 4585 (2023)
- [6] B. Kasal Wood Formation and properties|Mechanical Properties of Wood in *Encyclopedia of Forest Sciences*, pp 1815-1828 (2004)
- [7] J. M. Mercado-Colmenero et al. «A novel geometric predictive algorithm for assessing compressive elastic modulus in MEX additive processes, based on part nonlinearities and layers stiffness, validated with PETG and PLA materials» *Polymer Testing* **133**, pp 108389 (2024)