

## ***Εισαγωγή κινησιολογικών δεδομένων αλληλεπίδρασης μουσικού - μπαγκέτας - κυμβάλου σε FEM-BEM μοντέλα δονητικής και ακουστικής απόκρισης***

Στέλλα Πασχαλίδου<sup>1,\*</sup>, Κώστας Τσάμης<sup>1</sup>, Χρυσούλα Αλεξανδράκη<sup>1</sup>, Ευάγγελος Κασελούρης<sup>1,2,3</sup>, Βασίλης Δημητρίου<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, Ε. Δασκαλάκη, Περιβόλια, 74133, Ρέθυμνο

<sup>2</sup> Εργαστήριο Φυσικής Ακουστικής και Οπτοακουστικής, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, Ε. Δασκαλάκη, Περιβόλια, 74133, Ρέθυμνο

<sup>3</sup> Ινστιτούτο Φυσικής Πλάσματος και Λείζερ, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, Τρία Μοναστήρια, 74100, Ρέθυμνο

\*pashalidou@hmu.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία μελετάμε τη μηχανική, δονητική και ακουστικοδυναμική συμπεριφορά ενός κυμβάλου κατασκευασμένου από κράμα μπρούτζου B20, μέσω προσομοίωσης με αριθμητικές μεθόδους πεπερασμένων-οριακών στοιχείων FEM-BEM στο πεδίο του χρόνου. Η καινοτομία της εργασίας έγκειται στη χρήση πραγματικών τριδιάστατων δεδομένων σωματικής κίνησης, που καταγράφηκαν κατά την αλληλεπίδραση μουσικού-μπαγκέτας-κυμβάλου και τα οποία παρείχαν τις συνθήκες φόρτισης της αλληλεπίδρασης μπαγκέτας-κυμβάλου στο υπολογιστικό μοντέλο. Η συνδυασμένη καταγραφή κίνησης με προσομοιώσεις FEM-BEM επιτρέπει τον υπολογισμό των παραγόμενων ήχων σύμφωνα με τις αποκλίσεις που εισάγονται σκόπιμα από τους συμμετέχοντες κατά την πραγματική εκτέλεση. Προοδευτικά εντεινόμενες ελεύθερες κρούσεις χρησιμοποιήθηκαν ως συνθήκες φόρτισης τόσο για το πείραμα όσο και για την προσομοίωση. Μια ποιοτική σύγκριση των καταγεγραμμένων και προσομοιωμένων ήχων πραγματοποιήθηκε για τη διαπίστωση του εάν οι μεταβολές αυτές αποτυπώνονται στον ήχο που παράγεται από την προσομοίωση. Η προτεινόμενη μεθοδολογία προάγει μια νέα προοπτική στο σχεδιασμό, τη βελτιστοποίηση και την κατασκευή μουσικών οργάνων λαμβάνοντας υπόψη τις εκτελεστικές αποκλίσεις κατά την πραγματική εκτέλεση και ερμηνεία.

### ***Input of motion data for musician-drumstick-cymbal interaction into FEM-BEM vibrational and acoustic response models***

### **ABSTRACT**

*In the present work, we study the mechanical, vibrational and acoustic dynamic behavior of a cymbal made of B20 bronze alloy, through simulation with finite-*

*element FEM-BEM numerical methods in the time domain. The novelty of the work lies in the use of real 3D body motion data, recorded during the musician-drumstick-cymbal interaction, which provided the loading conditions of the drumstick-cymbal interaction in the computational model. Combined motion capture with FEM-BEM simulations allows the calculation of produced sounds according to deviations intentionally introduced by participants during actual performance. Progressively intensifying free impacts were used as loading conditions for both experiment and simulation. A qualitative comparison of the recorded and simulated sounds was performed to determine whether these changes are reflected in the sound produced by the simulation. The proposed methodology promotes a new perspective in the design, optimization and construction of musical instruments by taking into account executive deviations during actual performance and performance.*

## Εισαγωγή

Τα κύμβαλα είναι κοινά κρουστά όργανα και αναντικατάστατα μέρη των σετ τυμπάνων. Η ιστορία αυτών των μουσικών οργάνων (ιδιόφωνων) χρονολογείται από την αρχαιότητα, όταν παίζονταν με διάφορους τρόπους, πιο συχνά με μπαγκέτα, και εξακολουθούν να αποτελούν αναπόσπαστο μέρος των μουσικών οργάνων πολλών ειδών μουσικής. Χρησιμοποιούνται σε κρουστά σύνολα, τζαζ συγκροτήματα, ροκ συγκροτήματα, καθώς και σε μεγάλες ορχήστρες. Συνήθως, τα σετ τυμπάνων περιλαμβάνουν τουλάχιστον τέσσερις διαφορετικούς τύπους κυμβάλων, συγκεκριμένα, splash, crash, ride και hi-hat. Ο ήχος που παράγεται από ένα κύμβαλο είναι σύνθετος και σχετίζεται εγγενώς με τα δονητικά του χαρακτηριστικά, τα οποία εξαρτώνται από τις διαστάσεις, το σχήμα και το υλικό του [1]. Συνήθως, τα κύμβαλα κατασκευάζονται από κράματα που βασίζονται στον χαλκό. Ανάλογα με τον κατασκευαστή και τον τύπο του κυμβάλου, μικρές ποσότητες άλλων στοιχείων, όπως το αλουμίνιο, το ασήμι και ο χρυσός, μπορεί να προστεθούν στον χαλκό. Τα κράματα μπρούντζου όπως το B20 (80 τοις εκατό χαλκός, 20 τοις εκατό κασσίτερος) και το B8 (92 τοις εκατό χαλκός, 8 τοις εκατό κασσίτερος) χρησιμοποιούνται σήμερα ευρέως από γνωστούς κατασκευαστές κυμβάλων [2]. Επιπλέον, τα κράματα ορείχαλκου από χαλκό και ψευδάργυρο επιλέγονται για την κατασκευή τους με προκαθορισμένα ακουστικά χαρακτηριστικά. Στην [3], πραγματοποιήθηκαν προηγμένες αριθμητικές προσομοιώσεις με πεπερασμένα στοιχεία που περιλαμβάνουν ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων και συχνοτικής απόκρισης, ανάλυση στο πεδίο συχνότητας και στο πεδίο χρόνου με τη μέθοδο FEM-BEM (συνοριακών στοιχείων) για να μελετηθεί η ακουστοδυναμική συμπεριφορά τους. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ιδιοσυχνοτήτων συμφωνούν με τις πειραματικές μετρήσεις που βρίσκονται στη σχετική βιβλιογραφία. Ωστόσο, κατά την γνώση των συγγραφέων, η πραγματική κίνηση της μπαγκέτας για την κρούση και δόνηση των κυμβάλων δεν έχει μελετηθεί στη βιβλιογραφία [3-6].

Στην παρούσα ερευνητική εργασία, επικεντρωνόμαστε στην εισαγωγή των δεδομένων πραγματικής κίνησης της κινούμενης μπαγκέτας που αλληλεπιδρά με ένα κύμβαλο με συζευγμένες δονητικές ακουστικές αριθμητικές προσομοιώσεις. Μια FEM-BEM προσομοίωση περιγράφει την χρονικά μεταβαλλόμενη ακουστική δυναμική ενός splash πιατινιού από κράμα μπρούντζου B20. Τα δεδομένα πραγματικής τριδιάστατης κίνησης που καταγράφηκαν κατά την αλληλεπίδραση ντράμερ-μπαγκέτας-κυμβάλου καθορίζουν τις τιμές μετατόπισης, ταχύτητας και

επιτάχυνσης της κινούμενης μπαγκέτας σε διάφορες συνθήκες παιξίματος, παρέχοντας τις πραγματικές συνθήκες φόρτισης στα αριθμητικά μοντέλα. Η πρωτοτυπία της συγκεκριμένης εργασίας έγκειται στη χρήση πραγματικών τριδιάστατων δεδομένων σωματικής κίνησης ως δεδομένα εισόδου στο υπολογιστικό μοντέλο. Μια ποιοτική σύγκριση των καταγεγραμμένων και προσομοιωμένων ήχων πραγματοποιείται για να αποκαλύψει εάν οι αλλαγές του καταγεγραμμένου ήχου εκδηλώνονται στον ήχο που παράγεται από την προσομοίωση.

## 1. Μαθηματική Μοντελοποίηση

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM) και η μέθοδος συνοριακών στοιχείων (BEM) είναι πολύτιμες μαθηματικές μέθοδοι που είναι ικανές να προσομοιώσουν τη δονητική ακουστική συμπεριφορά μουσικών οργάνων όταν αλληλεπιδρούν με οποιοδήποτε τύπο φορτίων, δονήσεων και μεταβολών στις περιβαλλοντικές συνθήκες (δηλαδή, θερμοκρασία, υγρασία) [7]. Σε αυτή τη μελέτη, πραγματοποιούνται προσομοιώσεις FEM-BEM στο πεδίο του χρόνου. Η θεμελιώδης εξίσωση κίνησης για την δομική ανάλυση σε μητρική μορφή είναι:

$$[M] \left\{ \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \right\} + [C] \left\{ \frac{\partial U}{\partial t} \right\} + [K] \{U\} = \{F\} \quad (1)$$

όπου  $[M]$  είναι το μητρώο μάζας,  $\{U\}$  είναι το διάνυσμα μετατόπισης,  $[C]$  είναι το μητρώο απόσβεσης,  $[K]$  είναι το μητρώο δυσκαμψίας, και  $\{F\}$  είναι το διάνυσμα φορτίου. Η απόσβεση στο σύστημα μπορεί να καθοριστεί χρησιμοποιώντας έναν πολλαπλασιαστή του μητρώου δυσκαμψίας που σχηματίζει το μητρώο απόσβεσης ως  $[C] = \beta[K]$ , όπου  $\beta$  είναι η σταθερά απόσβεσης Rayleigh.

Το μαθηματικό μοντέλο FEM-BEM επιλύεται με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA, το οποίο επιλύει δονητικά ακουστικά προβλήματα, συνδυάζοντας τον επιλύτη χρονικά μεταβαλλόμενης προσομοίωσης FEM με τον ακουστικό επιλύτη BEM. Ο αέρας που περιβάλλει τη δονητική δομή μοντελοποιείται με BEM, όπου υπολογίζεται η πίεση του εκπεμπόμενου ήχου. Για την ανάλυση FEM-BEM, αρχικά πραγματοποιείται η ανάλυση FEM στο πεδίο του χρόνου και η δυναμική απόκριση της δομής μετατρέπεται στο πεδίο της συχνότητας μέσω του FFT. Στη συνέχεια, οι υπολογιζόμενες ταχύτητες στην επιφάνεια παρέχουν τις οριακές συνθήκες για τους ακουστικούς υπολογισμούς των BEM [3].

Η εξίσωση Helmholtz διέπει τη μετάδοση των ακουστικών κυμάτων (ανάλυση BEM στο πεδίο της συχνότητας) σε ένα ιδανικό ρευστό, χωρίς την παρουσία οποιασδήποτε πηγής όγκου [3]:

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

όπου  $p$  είναι η ακουστική πίεση και  $k$  ο κυματαριθμός. Με το θεώρημα του Green, η Εξίσωση (2) μετασχηματίζεται σε μια ολοκληρωτική εξίσωση. Έτσι, η πίεση σε οποιοδήποτε σημείο στο ρευστό μέσο εκφράζεται ως ένα ολοκλήρωμα της επιφανειακής πίεσης και της επιφανειακής ταχύτητας μιας δονούμενης δομής:

$$P_Q(\omega) = \int_S \left( G \frac{\partial p(\omega)}{\partial n} - p(\omega) \frac{\partial G}{\partial n} \right) dS \quad (3)$$

όπου  $P_Q(\omega)$  είναι η ηχητική πίεση σε ένα σημείο πεδίου  $Q$ ,  $S$  είναι η επιφάνεια της δομής,  $n$  είναι το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια  $S$ ,  $p(\omega)$  είναι η επιφανειακή πίεση,  $\omega$  είναι η γωνιακή συχνότητα του ακουστικού κύματος και  $G$  είναι η συνάρτηση Green, η οποία δίνεται από:

$$G = \frac{e^{-ikr}}{4\pi r} \quad (4)$$

όπου  $r$  είναι η απόσταση μεταξύ του σημείου ολοκλήρωσης της επιφάνειας και του σημείου πεδίου  $Q$ . Για προβλήματα δονητικής ακουστικής, η διατήρηση της ορμής στην οριακή επιφάνεια της δονητικής δομής οδηγεί στην εξής οριακή συνθήκη:

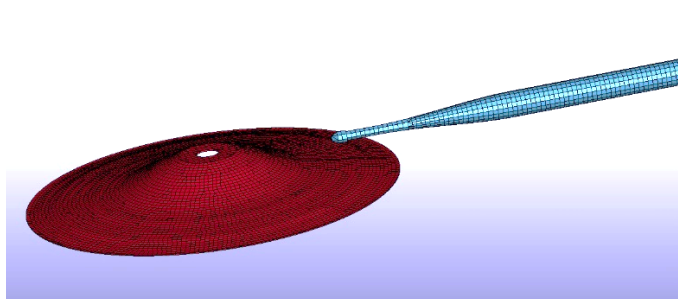
$$\partial p(\omega)/\partial n = -i\rho\omega v_n(\omega) \quad (5)$$

όπου  $\rho$  είναι πυκνότητα του ρευστού και  $v_n(\omega)$  κάθετη ταχύτητα στην επιφάνεια  $S$ . Αυτή η εξίσωση συσχετίζει την κανονική παράγωγο της πίεσης με την ταχύτητα.

## 2. Μοντελοποίηση και Προσομοίωση

Η γεωμετρία CAD ενός splash Zildjian κυμβάλου 8 ιντσών (20,32 cm) έχει σχεδιαστεί μαζί με τη γεωμετρία ξύλινης μπαγκέτας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Η διάμετρος της καμπάνας για το splash cymbal είναι 78 mm και η εσωτερική διάμετρος είναι 12,3 mm. Το πάχος από το κέντρο μέχρι την άκρη του πιατινιού ποικίλει και στην άκρη γίνεται 0,5 mm. Το μήκος της μπαγκέτας είναι 39,4 cm. Το πιατίνι μοντελοποιείται ως παραμορφώσιμο σώμα, ενώ η μπαγκέτα ως μη παραμορφώσιμο σώμα. Η γεωμετρία διακριτοποιείται με 30000 επιφανειακά FEM στοιχεία (τετραγωνικά στοιχεία) (σχήμα 1). Η γεωμετρία της σφαίρας αέρα που περιβάλλει το πιατίνι αποτελείται από 2000 στοιχεία BEM. Χρησιμοποιήθηκαν συγκεκριμένες, βιβλιογραφικές τιμές για ιδιότητες υλικού (πυκνότητα, μέτρο ελαστικότητας, λόγος Poisson) του κράματος B20 για το πιατίνι [8], καρυδιάς για τη μπαγκέτα [9] και σταθερή τιμή 0.001 για το λόγο απόσβεσης [3]. Όσον αφορά τις οριακές συνθήκες, οι μετατοπίσεις καθορίζονται για τους κόμβους που οριοθετούν την κεντρική τρύπα, προσομοιώνοντας τη στήριξη του κύμβалу βάσει των πειραματικών μετρήσεων [3]. Το χρονικό βήμα για τη χρονικά μεταβαλλόμενη μηχανική ανάλυση είναι 1  $\mu$ s.

Ένα εύρος συχνοτήτων 0–8000 Hz λαμβάνεται υπόψη για τις δονητικές ακουστικές προσομοιώσεις FEM-BEM πεδίου. Οι συχνότητες εξόδου ρυθμίζονται επίσης σε αυτό το εύρος, ενώ η ανάλυση ορίζεται στο 1 Hz. Ο αέρας είναι το ακουστικό μέσο στη θερμοκρασία δωματίου με πυκνότητα 1,21  $\text{kgm}^{-3}$  και ταχύτητα ήχου 340  $\text{ms}^{-1}$  σε πίεση αναφοράς 20  $\mu\text{Pa}$ . Ένας κόμβος χωρίς μάζα τοποθετείται 0,5 m πάνω από το σημείο κρούσης του κυμβάλου, το οποίο θεωρείται ότι έχει συντεταγμένες  $(X,Y,Z) = (0,0,0)$  m, όπου το  $X$  αντιστοιχεί στην απόσταση μήκους, το  $Y$  αντιστοιχεί στην απόσταση του πλάτους και το  $Z$  αντιστοιχεί στην απόσταση του ύψους. Αυτός ο κόμβος αντιστοιχεί σε μια υποτιθέμενη θέση μικροφώνου στο ακουστικό πεδίο, όπου μετράται η ηχητική πίεση που προκύπτει από την κρούση. Η χωρική θέση της μπαγκέτας σε σχέση με το κύμβало και οι τιμές της ταχύτητάς της υπό διαφορετικές συνθήκες, που καταγράφονται από ένα τριδιάστατο σύστημα καταγραφής κίνησης, εισάγονται ως αρχικές συνθήκες και συνθήκες φόρτισης στο μοντέλο FEM-BEM.



Σχήμα 1. Πλέγμα του *splash* πιατινιού και της μπαγκέτας

Οι εξαρτώμενες από το χρόνο προσομοιώσεις FEM-BEM του μοντέλου αλληλεπίδρασης μπαγκέτας-κύμβαλου έχουν υψηλές υπολογιστικές ανάγκες. Επομένως, για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιείται ο υπερ-υπολογιστής Υψηλής Απόδοσης (HPC) ARIS για παράλληλη επεξεργασία.

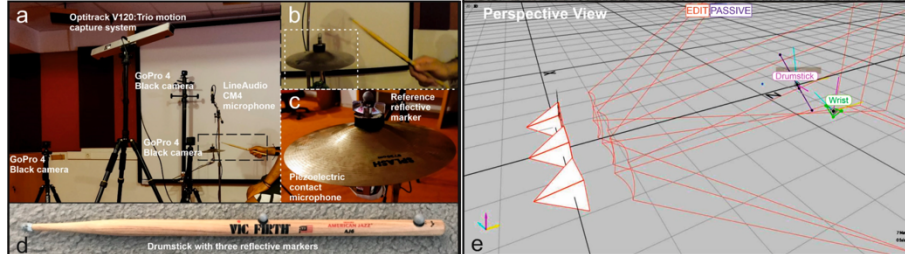
### 3. Πειραματική Διαδικασία

Ένα σύστημα καταγραφής κίνησης (motion capture - mocap) με χρήση σημειωτών (ανακλαστικών σφαιριδίων) χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή των πραγματικών συνθηκών φόρτισης που εφαρμόστηκαν στις προσομοιώσεις FEM-BEM. Συγκεκριμένα, τα τριδιάστατα δεδομένα θέσης καταγράφηκαν με ένα παθητικό οπτικό σύστημα (Optitrack V120: Trio) χωρικής ακρίβειας μικρότερης του χιλιοστού που αποτελούνταν από μια σειρά έξι υπέρυθρων ευρυγώνιων καμερών υψηλής ταχύτητας (Optitrack Primex 13W) με ρυθμό δειγματοληψίας 120 Hz. Ένα άκαμπτο σώμα μοναδικής γεωμετρίας δημιουργήθηκε πάνω στη μπαγκέτα με τη βοήθεια τριών ανακλαστικών σημειωτών (Σχήμα 2): δύο τοποθετημένων κατά μήκος του άξονά της —λίγο πριν και λίγο μετά το σημείο επαφής με το χέρι— και ενός που τυλίχθηκε γύρω από την κεφαλή της μπαγκέτας με ανακλαστικό συγκολλητικό υλικό. Ένα ακόμα άκαμπτο σώμα μοναδικής γεωμετρίας χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή της θέσης και του προσανατολισμού του καρπού, όπως είχε γίνει στο παρελθόν για την παρακολούθηση κίνησης ολόκληρου του σώματος στις [10,11]. Μονοφωνικός ήχος καταγράφηκε από ένα πυκνωτικό μικρόφωνο καρδιοειδούς τύπου (LineAudio CM4), τοποθετημένο περίπου 50 cm πάνω από το πιατίνι, στη μέση της απόστασης μεταξύ του κέντρου και της περιφέρειας, μέσω μιας συσκευής εγγραφής ήχου (Sound Devices MixPre-10 II) στα 96 kHz. Όλα τα ανακλαστικά αντικείμενα και υλικά του χώρου καλύφθηκαν για να αποφευχθούν αντανακλάσεις που θα μπορούσαν να ανιχνευτούν λανθασμένα από το σύστημα ως σημειωτές.

Από έναν επαγγελματία ντράμερ ζητήθηκε να εκτελέσει έξι κρούσεις με σταδιακά αυξανόμενη ένταση (δυναμικά επίπεδα που αντιστοιχούσαν σε *pianissimo*, *piano*, *mezzo-piano*, *mezzo-forte*, *forte* και *fortissimo*, που στη μουσική σημειογραφία συμβολίζονται με τα εξής σύμβολα: *pp*, *p*, *mp*, *mf*, *f*, *ff*), κατά τη διάρκεια των οποίων η μπαγκέτα ήταν ελεύθερη να αναπηδά. Όλες οι κρούσεις πραγματοποιήθηκαν σε συγκεκριμένη θέση πάνω στο πιατίνι των 8 ιντσών (στα 2/3 από το κέντρο) και με το πιατίνι προσαρμοσμένο με σταθερή και μέγιστη τάση πάνω στη βάση στήριξης. Η πειραματική διάταξη βιντεοσκοπήθηκε από τρεις κάμερες υψηλής ταχύτητας (GoPro 4 Black) τοποθετημένων σε διαφορετικές γωνίες. Για τον μετέπειτα συγχρονισμό ή την ευθυγράμμιση όλων των δεδομένων (κίνηση, ήχος, βίντεο) χρησιμοποιήθηκε

κατά τη διάρκεια του πειράματος μια κλακέτα, στην οποία προσαρτήθηκαν δύο ανακλαστικοί σημειωτές.

Η πειραματική διάταξη, μαζί με το σύστημα συντεταγμένων του συστήματος Optitrack V120:Trio, απεικονίζεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. (α) Πειραματική διάταξη που παρουσιάζει το σύστημα καταγραφής κίνησης Optitrack V120:Trio, τρεις κάμερες αναφοράς, το μικρόφωνο LineAudio CM4, το πιατίνι και τον ντράμερ, (β) μεγέθυνση της λεπτομέρειας του (α) στη θέση πιατίνι-ντράμερ, (γ) μεγέθυνση της λεπτομέρειας του (β) στο πιατίνι, τον δείκτη αναφοράς και το πιεζοηλεκτρικό μικρόφωνο επαφής, (δ) μπαγκέτα με τους τρεις προσαρτημένους ανακλαστικούς σημειωτές, (ε) το σύστημα συντεταγμένων του συστήματος Optitrack V120:Trio.

Η μέση δύναμη μιας κρούσης είναι ίση με τον ρυθμό μεταβολής της ορμής ή ανάλογη με τον ρυθμό μεταβολής της ταχύτητας (πριν και μετά την κρούση):

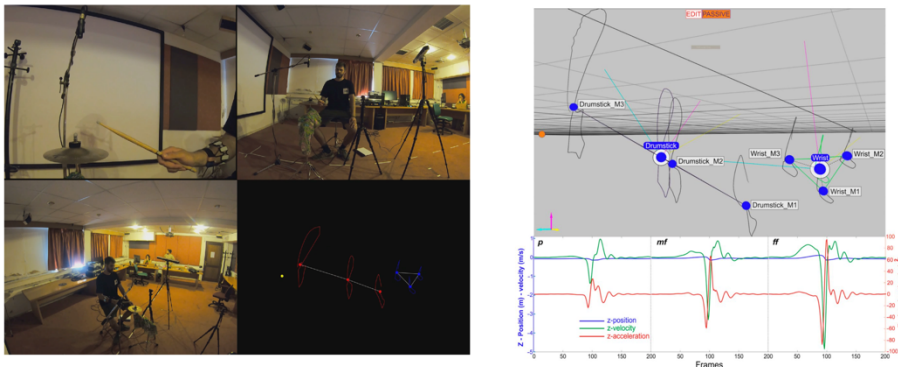
$$\{F\} = \left\{ \frac{\Delta p}{\Delta t} \right\} = [M] \left\{ \frac{\Delta v}{\Delta t} \right\} = [M] \left\{ \frac{v_{fin} - v_{init}}{\Delta t} \right\} \quad (6)$$

όπου  $\Delta p/\Delta t$  είναι ο ρυθμός μεταβολής της ορμής με το χρόνο,  $\Delta p = [M]\Delta v$ ,  $\Delta v$  είναι η μεταβολή της ταχύτητας, και  $[M]$  είναι ο πίνακας της μάζας. Για μια ανελαστική κρούση η μέγιστη δύναμη είναι διπλάσια της μέσης τιμής της, και, για λόγους απλότητας, θεωρείται ότι αυτό ισχύει και για το πιατίνι που έχει πακτωθεί με μέγιστη τάση στη βάση στήριξης. Η ενεργός μάζα που χρησιμοποιείται σε κάθε μεμονωμένη κρούση μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με την τεχνική κρατήματος της μπαγκέτας (το σημείο στήριξης που χρησιμοποιείται), καθώς και τη συνολική κίνηση του χεριού και την τροχιά του στον χώρο [12]. Επομένως, είναι δύσκολο να βρεθεί αξιόπιστος τρόπος υπολογισμού της εμπλεκόμενης μάζας. Έτσι, η μάζα θεωρείται σταθερός παράγοντας τόσο για την προσομοίωση όσο και για την πραγματική διέγερση και γι' αυτό παραλείπεται, με τη σχετική δύναμη να υπολογίζεται τελικώς ως ανάλογη με τον ρυθμό μεταβολής της ταχύτητας. Συνεπώς, μόνο η καταγεγραμμένη ταχύτητα και οι χωρικές συντεταγμένες της μπαγκέτας και του πιατινιού υιοθετούνται από το μοντέλο FEM-BEM.

Τα δεδομένα θέσης από το σύστημα καταγραφής κίνησης εκφράζονται σε μέτρα σε σχέση με ένα σταθερό σύστημα συντεταγμένων, με την αρχή του συνδεδεμένη στο κέντρο του συστήματος V120:Trio. Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε στο περιβάλλον του Matlab. Τα ελλιπή δεδομένα συμπληρώθηκαν μέσω γραμμικής παρεμβολής του τελευταίου δείγματος πριν από κάθε κενό με το πρώτο δείγμα μετά από κάθε κενό. Οι τιμές ταχύτητας και επιτάχυνσης υπολογίστηκαν από το `mtimer` στο Moco Toolbox (v1.5) ως εκτίμηση της πρώτης/δεύτερης τάξης χρονικής παραγώγου αντίστοιχα. Για τη συμπίεση του θορύβου από την παραγωγή

χρησιμοποιήθηκε ένα φίλτρο εξομάλυνσης Savitzky–Golay FIR με μήκος παραθύρου επτά καρτέ.

Το Σχήμα 3 αριστερά απεικονίζει την πειραματική διάταξη από τρεις διαφορετικές γωνίες θέασης (κάμερες), καθώς και τα άκαμπτα σωμάτια μπαγκέτας και καρπού, αλλά και την αποτύπωση των ιχνών όλων των σημειωτών για μία κρούση, το Σχήμα 3 δεξιά-επάνω εμφανίζει τα ίχνη των χειρονομιών όλων των σημειωτών και των κεντροειδών των άκαμπτων σωμάτων για το τελευταίο, σκληρότερο χτύπημα, ενώ το το Σχήμα 3 δεξιά-κάτω απεικονίζει τη θέση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση της κεφαλής της μπαγκέτας στον άξονα z για 200 καρτέ γύρω από τη χαμηλότερη θέση της για τρεις αντιπροσωπευτικές ελεύθερες κρούσεις, δηλαδή, *p*, *mf*, *ff*.



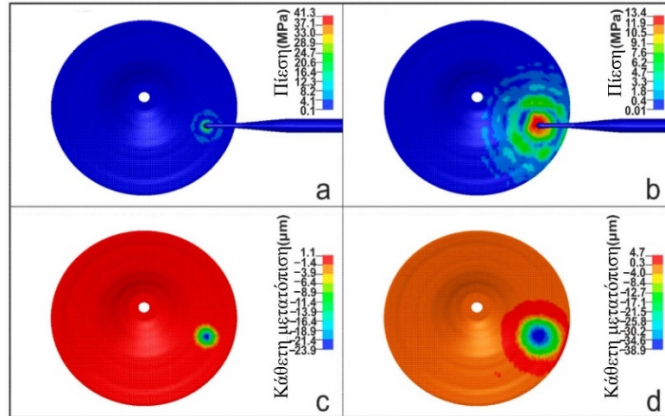
Σχήμα 3. Αριστερά: Η πειραματική διάταξη από τρεις διαφορετικές γωνίες θέασης, καθώς και η αποτύπωση των άκαμπτων σωμάτων μπαγκέτας και καρπού, αλλά και τα ίχνη όλων των σημειωτών για μία κρούση. Δεξιά-επάνω: Ίχνη για την κρούση *ff* για τους τρεις σημειωτές και τα κεντροειδή των άκαμπτων σωμάτων. Δεξιά-κάτω: Κατακόρυφη θέση, ταχύτητα και επιτάχυνση της κεφαλής της μπαγκέτας για τα τρία αντιπροσωπευτικά χτυπήματα, *p*, *mf* και *ff*.

#### 4. Αποτελέσματα και συζήτηση

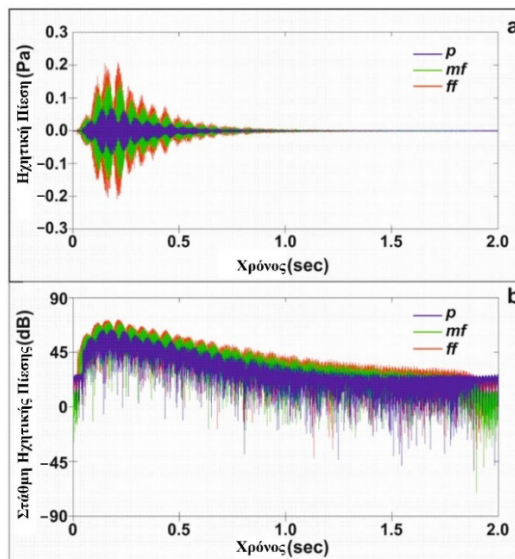
Στο σχήμα 4 απεικονίζονται αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα πίεσης (a,b) και κατακόρυφης μετατόπισης (c,d) για δύο χρονικές στιγμές αμέσως μετά την κρούση μεταξύ μπαγκέτας και κύμβαλου για το ελεύθερο χτύπημα *mf*. Οι μέγιστες τάσεις που αναπτύσσονται στο κύμβαλο στο σημείο κρούσης φτάνουν την τιμή των 40 MPa < τιμή αντοχής εφελκυσμού 125 MPa. Οι μέγιστες κατακόρυφες μετατοπίσεις στο σημείο κρούσης φτάνουν την τιμή των 38  $\mu\text{m}$ , ενώ η μέση τιμή των μέγιστων κατακόρυφων μετατοπίσεων, για χρόνο προσομοίωσης 2 s, είναι περίπου 15  $\mu\text{m}$ . Είναι εμφανής η δημιουργία bending waves που διαδίδονται προς τα έξω από το σημείο κρούσης. Αυτά τα κύματα ανακλώνται στις άκρες του οργάνου και οδηγούν σε μοτίβα στάσιμων κυμάτων που σχηματίζουν τους κανονικούς τρόπους δόνησης [13]. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται για τα μοντέλα που προσομοιώνουν τις ελεύθερες κρούσεις *p* και *ff*. Επιπλέον, το μοντέλο είναι ικανό να παρέχει έναν υπολογισμό του χρόνου επαφής: υπολογίζεται ότι είναι 0,25 ms για το γρήγορο χτύπημα *ff* και 0,35 ms για το πιο αργό χτύπημα *p*.

Στο σχήμα 5 παρουσιάζονται η ηχητική πίεση και το επίπεδο ηχητικής πίεσης (SPL) του προσομοιωμένου εκπεμπόμενου ήχου σε σημείο στον αέρα με συντεταγμένες  $(X,Y,Z)=(0.5,0,0.5)$  m, για τρεις προοδευτικά ενισχυόμενες ελεύθερες

κρούσεις,  $p$ ,  $mf$  και  $ff$ . Παρατηρείται η προοδευτική αύξηση του μέγιστου επιπέδου ηχητικής πίεσης στις κυματομορφές των  $p$ - $mf$ - $ff$ , επιβεβαιώνοντας ότι η συνεργασία της καταγραφής κίνησης και των προσομοιώσεων παρέχει μια έγκυρη προσέγγιση της δυναμικής συμπεριφοράς του πιατινιού, λόγω της μεταβαλλόμενης κρούσης της μπαγκέτας. Είναι επίσης σημαντικό να αναφερθούν οι μέγιστες υπολογισμένες τιμές πίεσης και SPL, οι οποίες, για το χτύπημα  $ff$ , είναι 0,2 Pa και 70 dB, αντίστοιχα.



Σχήμα 4. Κατανομή πίεσης του κυμβάλου στο (α) 0,1 ms και (β) 0,3 ms μετά την πρόσκρουση της μπαγκέτας στο όργανο για την κρούση  $mf$ . Κατακόρυφη μετατόπιση του κυμβάλου στο (γ) 0,1 ms και (δ) 0,3 ms μετά την πρόσκρουση της μπαγκέτας στο όργανο για την κρούση  $mf$ .



Σχήμα 5. Υπολογισμένες τιμές (α) ηχητικής πίεσης και (β) SPL του εκπεμπόμενου ήχου για τρεις σταδιακά ενισχυόμενες ελεύθερες κρούσεις  $p$ ,  $mf$ ,  $ff$ .

Το Σχήμα 6 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της FEM-BEM προσομοίωσης στο σημείο  $(X, Y, Z) = (0.5, 0, 0.5)$  m, όπως απεικονίζεται από το φασματογράφημα πίεσης του splash cymbal που χτυπήθηκε από τις ελεύθερες κρούσεις  $mf$  και  $ff$ , στο

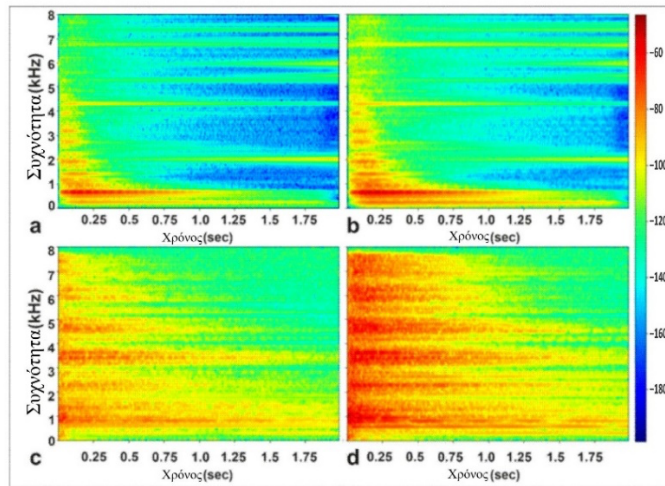


Σχήμα 6α και Σχήμα 6β, αντίστοιχα. Δείχνει επίσης τα ηχητικά αποτελέσματα που καταγράφηκαν για τα ίδια χτυπήματα  $p$  και  $ff$ , στο Σχήμα 6γ και Σχήμα 6δ, αντίστοιχα. Από τη σύγκριση των ζευγών των φασματογραμμάτων των κρούσεων  $p$  και  $ff$  στην πειραματική μέτρηση και υπολογιστική προσέγγιση διαπιστώνουμε ότι η υπολογιστική προσέγγιση ακολουθεί τη συμπεριφορά του πραγματικού ήχου, δηλαδή μια αύξηση της ηχητικής πίεσης και παραγωγή ενός πιο πλούσιου φάσματος της ισχυρότερης ως προς την πιο ασθενή κρούση.

Συμπερασματικά, η προσομοίωση ακολουθεί τις αποκλίσεις που εισάγονται σκόπιμα από τους μουσικούς κατά την μουσική εκτέλεση. Η απόκλιση που παρατηρείται στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του ήχου ανάμεσα στο μοντέλο και τον καταγεγραμμένο αποδίδεται στους εξής παράγοντες:

- Οι διαφορετικές τιμές στις παραμένουσες τάσεις κατά τα στάδια κατεργασίας που αναφέρθηκαν δεν λαμβάνονται υπόψη στο μοντέλο
- Η τιμή της απόσβεσης που τέθηκε στο μοντέλο είναι σταθερή και βιβλιογραφική και όχι πειραματικά προσδιορισμένη
- Η γεωμετρική προσέγγιση του μοντέλου CAD σε βαθμούς παρεμβολής
- Τα πιατίνια σε υψηλές συχνότητες παρουσιάζουν μη γραμμική χαστική ακουστική συμπεριφορά
- Η περιορισμένη για τις ανάγκες του πειράματος συχνότητα δειγματοληψίας των δεδομένων κίνησης

Στο μέλλον σκοπεύουμε να βελτιώσουμε τη γεωμετρική παρεμβολή και να συμπεριλάβουμε μικρές γεωμετρικές αποκλίσεις (σφυρηλάτηση) και παράλληλα τη μελέτη συμπεριφοράς ακατέργαστου επίπεδου μεταλλικού δίσκου.



Σχήμα 6. Αποτελέσματα από την ανάλυση FEM-BEM για το σημείο  $(X,Y,Z) = (0.5,0,0.5)$  m, όπως παρουσιάζονται στο φάσμα πίεσης για το πιατίνι που χτυπήθηκε από τις κρούσεις  $p$  και  $ff$  (εικόνες a και b). Επίσης, απεικονίζονται τα καταγεγραμμένα αποτελέσματα ήχου για τις ίδιες κρούσεις  $p$  και  $ff$  (c και d αντίστοιχα).

## 5. Συμπεράσματα-Μελλοντικές Προοπτικές

Η προτεινόμενη μεθοδολογία προάγει μια νέα προοπτική στο σχεδιασμό, τη βελτιστοποίηση και την κατασκευή μουσικών οργάνων λαμβάνοντας υπόψη τις

εκτελεστικές αποκλίσεις κατά την πραγματική εκτέλεση και ερμηνεία, τις οποίες ενσωματώνουμε με χρήση της πραγματικής τριδιάστατης κίνησης που ενεργοποιεί τις ταλαντώσεις ενός πιατινιού ως δεδομένα φόρτισης στο μοντέλο. Απώτερος μελλοντικός στόχος είναι να αναπτύξουμε και να εκπαιδύσουμε μοντέλα μηχανικής μάθησης για το σχεδιασμό νέων πιατινιών προκαθορισμένων υλικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών, ικανά να ανταποκρίνονται ηχητικά στις πραγματικές κινήσεις ενός μουσικού ανάλογα με τις προτιμήσεις του ως προς τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του ήχου.

## 6. Ευχαριστίες

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.

## 7. Αναφορές

- [1] T. D. Morrison et al. «Acoustics of percussion instruments: An update» *Acoustical Science and Technology*, **25**, 406-412 (2004)
- [2] Available online: <https://www.moderndrummer.com/2011/10/what-you-need-to-know-about-cymbal-alloys/> (accessed on 17 October 2024)
- [3] E. Kaselouris et al. «A detailed FEM Study on the Vibro-acoustic Behaviour of Crash and Splash Musical Cymbals» *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, **16**, 948-955 (2022)
- [4] F. Kuratani et al. «Understanding the effect of hammering process on the vibration characteristics of cymbals» *Journal of Physics: Conference Series*, **744**, 12110 (2016)
- [5] T. Samejima «Nonlinear physical modeling sound synthesis of cymbals involving dynamics of washers and sticks/mallets» *Acoustical Science and Technology*, **42**, 314-325 (2021)
- [6] A. Tatsuhito et al. «Relationship between chaotic vibrations and acoustic properties of percussion cymbals» *Results in Engineering*, **14**, 100419 (2022)
- [7] E. Kaselouris et al. «A Review of Finite Element Studies in String Musical Instruments» *Acoustics*, **4**, 183-202 (2022)
- [8] Meinl. *The Meinl Cymbals Catalogue—Inspire*; Meinl: Gutenstetten, Germany, 2004
- [9] P. Mania et al. *Effect of Slope Grain on Mechanical Properties of Different Wood Species» Materials*, **13**, 1503 (2020)
- [10] S. Paschalidou «Effort inference and prediction by acoustic and movement descriptors in interactions with imaginary objects during Dhrupad vocal improvisation» *Wearable Technologies*, **3**:e14, 1-28 (2022)
- [11] S. Paschalidou, T. Eerola, M. Clayton «Voice and movement as predictors of gesture types and physical effort in virtual object interactions of classical Indian singing» in *Proceedings of the 3rd International Symposium on Movement and Computing (MOCO '16)*, 1-2 (2016)
- [12] S. Dahl «Striking movements: A survey of motion analysis of percussionists» *Acoustical Science and Technology*, **32**, 168-173 (2011)
- [13] S. Schedin et al. *Transient wave response of a cymbal using double-pulsed TV holography» Journal of the Acoustical Society of America*, **103**, 1217-1220 (1998)