

Συστηματική μελέτη των σφαιρικών κατευθυντικών ιδιοτήτων του λαούτου, της λάφτας και του ουτιού

Ιωάννης Μαλαφής*, Πηνελόπη-Μαρία Πιερρουτσάκου,
Κωνσταντίνος Μπακογιάννης, Αρετή Ανδρεοπούλου
Εργαστήριο Μουσικής Ακουστικής Τεχνολογίας (LabMAT)
Τμήμα Μουσικών Σπουδών, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
*ymalafis@music.uoa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μελέτη διερευνά τη σφαιρική κατευθυντικότητα και τα μοτίβα ακτινοβολίας του Λαούτου, της Λάφτας και του Ουτιού, παραδοσιακών αχλαδόσχημων νυκτών οργάνων από τη Μέση Ανατολή, την Τουρκία, την Ελλάδα και τις γύρω περιοχές, παρέχοντας πληροφορίες για τις ακουστικές ιδιότητες του ήχου που διαδίδουν σε έναν τρισδιάστατο χώρο. Η ανάλυση αποκάλυψε ότι όλα τα όργανα, ανεξάρτητα από τις παραλλαγές στη γεωμετρία και το υλικό τους, παρουσιάζουν παρόμοια μοτίβα ακτινοβολίας σε όλες τις ζώνες συχνοτήτων, δικαιολογώντας τη διαισθητική ταξινόμησή τους στην "οικογένεια των λαούτων". Παρ' όλα αυτά, είναι εμφανείς οι διαφοροποιήσεις στην προβολή του ήχου προς όλες τις κατευθύνσεις μεταξύ των τύπων οργάνων, οι οποίες μπορούν να αποδοθούν σε διαφορές στις κατασκευαστικές λεπτομέρειες και στο υλικό των χορδών. Παρατηρείται επίσης η επίδραση του σώματος του μουσικού στην κατευθυντικότητα.

Exploring the Directivity of the Lute, Lavta, and Oud Plucked String Instruments

ABSTRACT

This study investigates the spherical directivity and radiation patterns of the Lute, Lavta, and Oud, pear-shaped traditional plucked-string instruments from the Middle East, Turkey, Greece, and the surrounding areas, providing insights into the acoustic qualities of their propagated sound in a three-dimensional space. Instruments were categorized according to string material. The analysis revealed that all instruments, regardless of their variations in geometry and material, exhibit similar radiation patterns across all frequency bands, justifying their intuitive classification within the "Lute family". Nevertheless, variations in sound projection across all directions are evident between instrument types, which can be attributed to differences in construction details and string material. The impact of the musician's body on directivity is also observed.

Εισαγωγή

Η μελέτη των ακουστικών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων των μουσικών οργάνων αποτελεί ένα ευρέως διαδεδομένο επιστημονικό αντικείμενο μελέτης καθώς βρίσκει άμεση εφαρμογή σε διάφορους κλάδους όπως αυτοί της μουσικής ακουστικής, της ηχητικής μοντελοποίησης, της ακουστικής χώρων, της ηχοληψίας, της εικονικής/επαυξημένης πραγματικότητας κ.α. Ένα από τα χαρακτηριστικά αυτά, η κατευθυντικότητα των ηχητικών πηγών, βρέθηκε στις μέρες μας ξανά στο επίκεντρο με αφορμή τη στροφή της έρευνας και της βιομηχανίας προς περιβάλλοντα και εφαρμογές εικονικής/επαυξημένης πραγματικότητας και αυξημένης της ανάγκης για μαζική παραγωγή και καταγραφή ρεαλιστικού ηχητικού περιεχομένου. Με τον όρο κατευθυντικότητα περιγράφεται η ισχύς με την οποία κάθε ηχητική πηγή εκπέμπει ενέργεια προς όλες τις κατευθύνσεις στον περιβάλλοντα χώρο, [1] η οποία μεταξύ άλλων εξαρτάται από το είδος του μουσικού οργάνου, το σχήμα του, τα υλικά κατασκευής του, τη μέθοδο διέγερσης κλπ. Η διέγερση της ηχητικής πηγής γίνεται είτε μέσω κάποιου μηχανισμού [2], είτε με τη βοήθεια μουσικών [3].

Ωστόσο, ενώ τα ευρωπαϊκά μουσικά όργανα όπως όπως π.χ. η κιθάρα (κλασική, ακουστική) το βιολί, το πιάνο, το φλάουτο, κλπ έχουν μελετηθεί εκτενώς όσον αφορά στο ηχόχρωμα, στα φασματικά χαρακτηριστικά τους και στις κατευθυντικές αποκρίσεις τους, [4, 5, 6, 7], δεν συμβαίνει το ίδιο για μουσικά όργανα άλλων πολιτισμών, όπου οι πληροφορίες είναι πολύ περιορισμένες [8, 9]. Σε μια προσπάθεια να περιοριστεί αυτό το ερευνητικό κενό το Εργαστήριο Μουσικής Ακουστικής Τεχνολογίας (LabMAT) του Τμήματος Μουσικών Σπουδών του ΕΚΠΑ, έχει ξεκινήσει συστηματική έρευνα με στόχο τη μελέτη και παρουσίαση των ακουστικών χαρακτηριστικών των ελληνικών παραδοσιακών μουσικών οργάνων και της παραδοσιακής και βυζαντινής φωνητικής μουσικής [10, 11].

Ως αποτέλεσμα της εν λόγω έρευνας, η παρούσα εργασία εξετάζει τις κατευθυντικές ιδιότητες νυκτών αχλαδόσχημων παραδοσιακών έγχορδων οργάνων τα οποία απαντώνται στη χώρα μας και στην ευρύτερη λεκάνη της Ανατολικής Μεσογείου και της Μέσης Ανατολής, εστιάζοντας στο στεριανό λαούτο, το πολιτικό λαούτο (λάφτα) και το ούτι. Στη μελέτη αυτή παρουσιάζεται για πρώτη φορά με συστηματικό τρόπο η σφαιρική κατευθυντικότητα των οργάνων αυτών συναρτήσει των δύο παραγόντων της: α) της ηχητικής προβολής (sound projection) και β) των μοτίβων εκπομπής (radiation patterns), με στόχο την αποτύπωση των ηχητικών και ηχοχρωματικών ομοιοτήτων και διαφορών τους στον τρισδιάστατο χώρο.

1. Μεθοδολογία

1.1 Συλλογή δεδομένων

Η εν λόγω μελέτη βασίζεται στην ηχογράφηση τεσσάρων (4) στεριανών λαούτων, τεσσάρων (4) πολιτικών λαούτων (λάφτες) και δύο (2) ουτιών, κατασκευασμένα από έγκριτους κατασκευαστές με πολυετή πείρα. Τα όργανα που

χρησιμοποιήθηκαν ποικίλων σε ποιότητες. Οι βασικές τους διαφοροποιήσεις σχετίζονται με το σχήμα και το μέγεθος του ηχείου, το μήκος του μπράτσου και το είδος των χορδών που χρησιμοποιούν.



Σχήμα 1.1 Λαούτο (αριστερά), Ούτι (κέντρο), Πολίτικο Λαούτο ή Λάφτα (δεξιά)

Οι ηχογραφήσεις πραγματοποιήθηκαν από τρεις (3) επαγγελματίες μουσικούς εγνωσμένου κύρους, οι οποίοι έπαιξαν ως εξής: Μουσικός Α' Λαούτα και Λάφτες, Μουσικός Β' Ούτια Λαούτα Ούτια και Λάφτες, Μουσικός Γ' Λαούτα και Λάφτες.

Συνολικά ηχογραφήθηκαν 4 λαούτα από διαφορετικούς κατασκευαστές. Οι μεμονομένες νότες που καταγράφηκαν είναι οι ανοιχτές χορδές (μεταλλικές) Λα, Ρε, Σολ, Ντο και σε κάθε χορδή οι νότες που παράγονται στο 5ο και 9ο τάστο. Κάθε μουσικός εκτέλεσε επίσης και έναν αυτοσχεδιασμό στο εκάστοτε όργανο.

Ηχογραφήθηκαν 4 λάφτες κατασκευασμένες από διαφορετικούς κατασκευαστές, οι οποίες βρίσκονται σε τονικότητες Σιb, Ντο και Ρε. Οι χορδές είναι clear nylon και wounded, διπλές σε ταυτοφωνία. Οι νότες που ηχογραφήθηκαν είναι οι ανοιχτές χορδές του οργάνου, καθώς και το διάστημα 5^{ης} καθαρής σε κάθε χορδή. Κάθε μουσικός εκτέλεσε επίσης και έναν αυτοσχεδιασμό στο εκάστοτε όργανο.

Ηχογραφήθηκαν τέλος 2 ούτια. Οι χορδές είναι clear nylon και wounded, διπλές σε ταυτοφωνία και σε οκτάβες. Οι νότες που ηχογραφήθηκαν είναι οι ανοιχτές χορδές του οργάνου, καθώς και το διάστημα 5^{ης} καθαρής σε κάθε χορδή. Κάθε μουσικός εκτέλεσε επίσης και έναν αυτοσχεδιασμό διάρκειας 60'' έως 90'' στο εκάστοτε όργανο.

1.2 Ηχογράφιση και μετα-επεξεργασία δεδομένων

Οι ηχογραφήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ημι-ανηχοϊκό, ειδικά διαμορφωμένο ακουστικά χώρο διαστάσεων 10x7x5 m του εργαστηρίου Μουσικής Ακουστικής Τεχνολογίας (LabMAT) του τμήματος Μουσικών Σπουδών (ΕΚΠΑ). Για την ηχογράφιση χρησιμοποιήθηκε διάταξη 29 πυκνωτικών μικροφώνων RODE-M5, τα οποία τοποθετήθηκαν συμμετρικά σε ημισφαιρικό γεωδαιτικό θόλο.

Δώδεκα (12) μικρόφωνα τοποθετήθηκαν στο οριζόντιο επίπεδο σε ίσες αζιμουθιακές αποστάσεις των 30° και από οκτώ (8) μικρόφωνα στα επίπεδα των +30° και -30° γωνία κλίσης σε ίσες αζιμουθιακές αποστάσεις των 45°. Το 29ο μικρόφωνο τοποθετήθηκε στην κορυφή του θόλου σε γωνία κλίσης 90°, ακριβώς

πάνω από το όργανο. Αναλυτικές πληροφορίες για την διαδικασία της ηχογράφησης και βαθμονόμησης του εξοπλισμού καθώς και για την μεταεπεξεργασία των δεδομένων της ηχογράφησης, περιλαμβάνονται στο ακόλουθο άρθρο [12].



Σχήμα 1.1 Η διάταξη του ημισφαιρικού κλωβού μέσω της οποίας διενεργήθηκαν οι ηχογραφήσεις.

Η μελέτη αυτή αποσκοπεί στο να αποτυπώσει την κατευθυντικότητα των υπό μελέτη οργάνων σε ρεαλιστικές συνθήκες εκτέλεσης. Για τον λόγο αυτό, αφενός η διέγερση του εκάστοτε οργάνου δεν έγινε από κάποιον μηχανισμό αλλά από μουσικό, αφετέρου οι μουσικοί και τα όργανα δεν ήταν αυστηρά ακινητοποιημένα σε κάποια θέση αλλά τοποθετημένα με τέτοιο τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η ευθυγράμμιση της ηχητικής πηγής με τη μικροφωνική διάταξη καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων, επιτρέποντας ωστόσο στον μουσικό να πραγματοποιεί κινήσεις περιορισμένου εύρους, απαραίτητες για το παίξιμο του οργάνου. Επομένως, τα δεδομένα κατευθυντικότητας που συνελέχθησαν αφορούν το σύστημα μουσικό όργανο και οργανοπαίκτη/σώμα μουσικού [14]. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην ακρίβεια τοποθέτησης του οργάνου εντός της μικροφωνικής διάταξης, έτσι ώστε το σημείο νύξης της χορδής, το οποίο στα έγχορδα θεωρείται ως το ακουστικό κέντρο του οργάνου να βρίσκεται πάντα στο κέντρο της σφαίρας, σε ίσες αποστάσεις από τα μικρόφωνα. Αυτό επιτεύχθηκε με τη χρήση ακτίνων λέιζερ που στόχευαν στο κέντρο της ημισφαιρικής διάταξης, ενώ παρατηρητές εξασφάλιζαν ότι το όργανο παρέμενε ευθυγραμμισμένο καθ' όλη τη διάρκεια της ηχογράφησης. Αν υπήρχε οποιαδήποτε απόκλιση, η ηχογράφηση επαναλαμβανόταν. Επίσης, όσον αφορά στην κατεύθυνση του συστήματος μουσικό όργανο - οργανοπαίκτης δόθηκε η οδηγία στους μουσικούς να παίζουν με κατεύθυνση προς τα μπροστά (προς έναν θεωρητικό ακροατή που βρίσκεται στη θέση του μικροφώνου με συντεταγμένες 0° , 0° (αζιμούθια γωνία, γωνία κλίσης) κρατώντας το όργανο με φυσικό τρόπο.

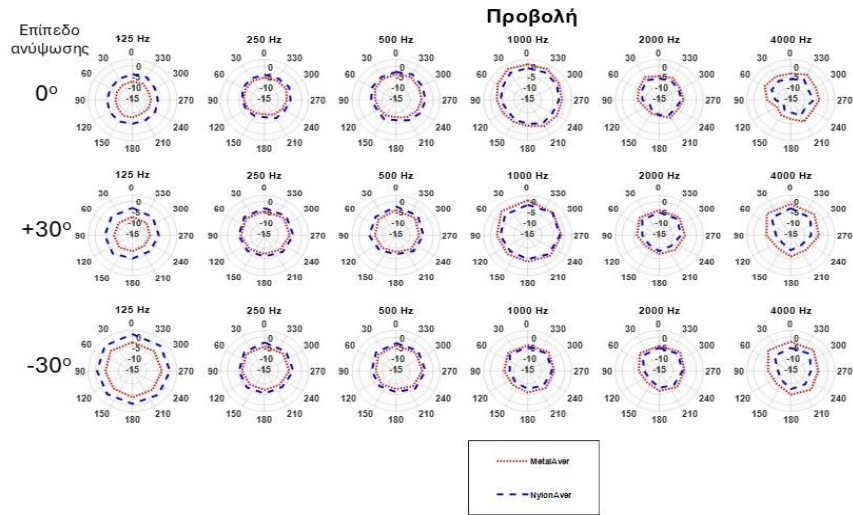
2. Αποτελέσματα

Η μελέτη της κατευθυντικότητας ηχητικών πηγών αφορά δύο συνιστώσες: α) την ηχητική προβολή (sound projection), δηλαδή το μέγεθος της ηχητικής ενέργειας σε κάθε γωνία καταγραφής ανά συχνοτική ζώνη και β) το μοτίβο εκπομπής (radiation pattern), δηλαδή τη σχέση της εκπεμπόμενης ηχητικής ενέργειας μεταξύ γωνιών καταγραφής ανά συχνοτική ζώνη. Δύο ηχητικές πηγές μπορεί να έχουν όμοια μοτίβα εκπομπής αλλά να διαφέρουν σημαντικά ως προς την ηχητική τους προβολή, έχοντας επομένως διαφορετικά μοτίβα κατευθυντικότητας. Συχνά ωστόσο, αναλόγως της ανάλυσης και των επιλογών κανονικοποίησης των δεδομένων η μελέτες κατευθυντικότητας επικεντρώνονται στη μία εκ των δύο συνιστωσών μη αναδिकνύοντας πλήρως τις κατευθυντικές ιδιότητες των υπό μελέτη πηγών [13].

Σε μια προσπάθεια παρουσίασης μιας ολοκληρωμένης μελέτης της κατευθυντικότητας των μουσικών οργάνων, η παρούσα μελέτη εστιάζει χωριστά σε κάθε μια από τις δύο συνιστώσες (ηχητική προβολή και μοτίβο εκπομπής). Για τον υπολογισμό των διαγραμμάτων ηχητικής προβολής τα δεδομένα βαθμονομήθηκαν με τον τρόπο που περιεγράφηκε στην Ενότητα 1 (Μεθοδολογία). Πιο συγκεκριμένα, για κάθε ένα από τα 29 μικρόφωνα υπολογίστηκαν κατάλληλοι συντελεστές βαθμονόμησης (scaling factors) ώστε να προκύπτει σε όλα τα μικρόφωνα κοινή rms συνολική ενέργεια σε σήμα ροζ θορύβου εκπεμπόμενο από παντοκατευθυντική πηγή στο κέντρο της μικροφωνικής διάταξης. Για τον υπολογισμό των μοτίβων εκπομπής των οργάνων προστέθηκε ένα ακόμα βήμα στην επεξεργασία των ηχητικών δεδομένων, τα οποία κανονικοποιήθηκαν σε σχέση με την rms κάθε συχνοτικής ζώνης του μικροφώνου που βρίσκεται στις 90° ακριβώς πάνω από το όργανο. Με τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνεται η καθαρότερη οπτικοποίηση των δεδομένων διατηρώντας ταυτόχρονα πληροφορίες σχετικά με την κατανομή της ενέργειας ανά γωνία καταγραφής και συχνοτική ζώνη. Η παράθεση των αποτελεσμάτων γίνεται σε πολικά διαγράμματα οκταβικών ζωνών με συχνοτικά κέντρα από τα 125 Hz έως τα 4 kHz.

2.1 Σφαιρική κατευθυντικότητα - η περίπτωση της προβολής

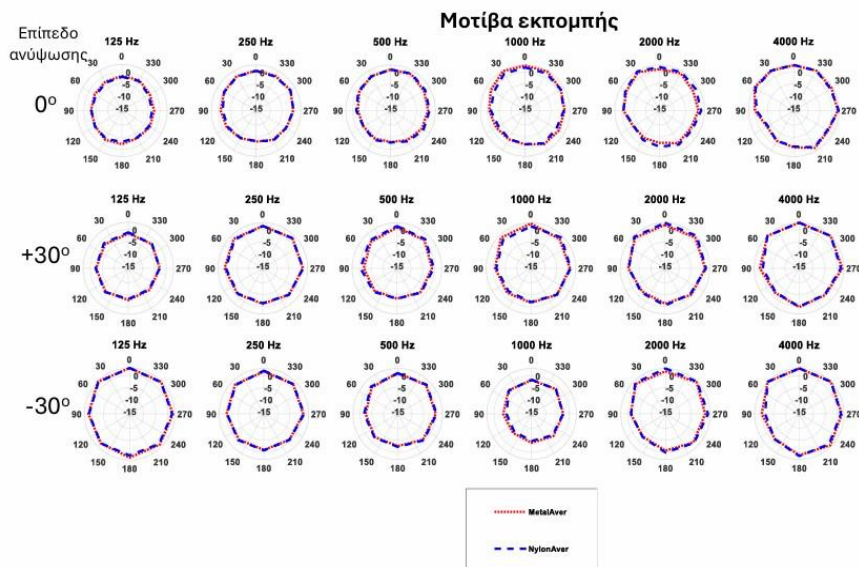
Στο σχήμα 2.1. απεικονίζεται σε πολικά διαγράμματα η προβολή του ήχου που εκπέμπεται από τα μουσικά όργανα, με μπλε γι' αυτά με μεταλλικές χορδές και κόκκινο με νάιλον χορδές. Παρατηρούμε ότι και στις δύο κατηγορίες οργάνων η ενέργεια αυξάνεται μέχρι την οκταβική ζώνη με συχνοτικό κέντρο το 1 kHz, οπότε μεγιστοποιείται και ελαττώνεται εκ νέου. Επίσης, παρατηρούμε ότι μέχρι και την οκταβική ζώνη με κεντρική συχνότητα τα 500 Hz τα όργανα με νάιλον χορδές παρουσιάζουν πιο ευρεία προβολή σε σχέση με αυτά με μεταλλικές χορδές, το οποίο αντιστρέφεται σταδιακά από την οκταβική ζώνη του 1 kHz.



Σχήμα 2.1. Πολικά διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν τη μέση προβολή των οργάνων με μεταλλικές και νάιλον χορδές (μπλε και κόκκινα αντίστοιχα) ανά οκταβική ζώνη στα τρία επίπεδα ανύψωσης.

2.2. Σφαιρική κατευθυντικότητα - η περίπτωση των μοτίβων εκπομπής

Στο σχήμα 2.2 απεικονίζονται τα μέσα μοτίβα εκπομπής των ήχων που εκπέμπονται από όργανα με μεταλλική και νάιλον χορδή (κόκκινα και μπλε πολικά διαγράμματα αντίστοιχα). Παρατηρούμε ότι οι δύο κατηγορίες παρουσιάζουν πανομοιότυπα μοτίβα εκπομπής. Επίσης, η ενέργεια μεταδίδεται περισσότερο προς τα μπροστά σε σχέση με πίσω (διαφορά 2 έως 4 dB στις 0° σε σχέση με τις 180° αζιμουθιακές γωνίας) με εξαίρεση την οκταβική ζώνη των 125 Hz, η οποία ως η πιο χαμηλή παρουσιάζει περισσότερο παντοκατευθυντική συμπεριφορά, όπως αναμενόταν. Τα πολικά διαγράμματα είναι στην πλειοψηφία τους συμμετρικά δεξιά - αριστερά, με εξαίρεση τις συχνοτικές ζώνες των 2 kHz και 4 kHz, στις οποίες η πίσω αριστερά πλευρά παρουσιάζει μικρότερη ενέργεια σε σχέση με την πίσω δεξιά πλευρά γεγονός το οποίο αιτιολογείται από το σώμα του (δεξιόχειρα) μουσικού [14].



Σχήμα 2.2. Πολικά διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν τα μέσα μοτίβα εκπομπής των οργάνων με μεταλλικές και νάιλον χορδές (μπλε και κόκκινα αντίστοιχα) ανά οκταβική ζώνη στα τρία επίπεδα ανύψωσης.

3. Επίλογος - Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία επιχειρεί να συνδράμει στην ευρύτερη μελέτη της ελληνικής παραδοσιακής μουσικής, ειδικότερα δε στη μελέτη των συγκεκριμένων οργάνων και να δώσει κάποια πρώτα στοιχεία για το αχарτογράφητο πεδίο της σφαιρικής κατευθυντικότητάς τους. Σκοπός της είναι να αποτυπωθεί το μοτίβο εκπομπής κάθε οργάνου καθώς και να προσδιοριστούν οι ομοιότητες και οι διαφορές ανάμεσα σε όργανα της ίδιας οικογένειας από διαφορετικούς κατασκευαστές αλλά και σε ομάδες οργάνων με κοινά χαρακτηριστικά π.χ. όργανα με μεταλλικές χορδές – όργανα με nylon.

Η ανάλυση της ηχητικής προβολής αποκάλυψε ότι τόσο οι νάιλον όσο και οι μεταλλικές χορδές παρουσιάζουν συχνοτικές τάσεις, με σταθερότητα στις χαμηλότερες συχνότητες, μια κορυφή στο 1 kHz και μια μείωση πέρα από αυτό το σημείο. Τα όργανα με χορδές νάιλον παρουσιάζουν ευρύτερη ηχητική προβολή στις χαμηλότερες συχνότητες, ενώ οι μεταλλικές χορδές υπερέχουν στις υψηλότερες συχνότητες. Αυτές οι διαφορές αποδίδονται σε διαφορές στην κατασκευή του οργάνου, όπως το πάχος του καπακιού, το κούρδισμα των χορδών και ο χρόνος απελευθέρωσης του ήχου.

Τα μέσα διαγράμματα ακτινοβολίας για όργανα με νάιλον και μεταλλικές χορδές παρουσιάζουν παρόμοια σχήματα, υποδεικνύοντας συγκρίσιμα διαγράμματα ακτινοβολίας. Η μετάδοση ενέργειας είναι υψηλότερη στο μπροστινό μέρος από ό,τι στο πίσω μέρος, εκτός από τα 125 Hz, τα οποία είναι σχεδόν πανταχού παρόντα. Αυτή η προβολή με επίκεντρο το μπροστινό μέρος

αποδίδεται στον προσανατολισμό του οργάνου και στην απορρόφηση του ήχου από το σώμα του μουσικού. Η συμμετρία αριστερά-δεξιά γενικά απουσιάζει, ιδιαίτερα στο μπροστινό-αριστερό μέρος σε σύγκριση με το μπροστινό-δεξί μέρος, πιθανότατα λόγω κατασκευαστικών λεπτομερειών και της επιρροής του δεξιού χεριού. Ασυμμετρία παρατηρείται επίσης στο πίσω μέρος, όπου η πίσω αριστερή πλευρά έχει χαμηλότερες τιμές, ενδεχομένως λόγω της ακουστικής σκιάς που δημιουργείται από το σώμα του μουσικού.

Εκτιμούμε, ότι εκτός από το εγγενές επιστημονικό ενδιαφέρον μιας τέτοιας πρωτότυπης μελέτης, μπορούν να προκύψουν αξιόλογα συμπεράσματα με πρακτικές απολήξεις. Για παράδειγμα, η μελέτη αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί για την ανάπτυξη εργαλείων ηχογράφησης των εν λόγω οργάνων, την επιστημονική τεκμηρίωση στην τοποθέτησή τους σε ευρύτερα μουσικά σχήματα καθώς και την σωστή τοποθέτησή τους σε περιβάλλον studio ηχογράφησης βάση του μοτίβου εκπομπής τους. Επίσης, μπορεί να συνδράμει στη δημιουργία ψηφιακών βάσεων δεδομένων κατευθυντικότητας για χρήση σε ψηφιακά περιβάλλοντα ακουστικών προσομοιώσεων εκτεταμένης πραγματικότητας (XR).

4. Ευχαριστίες

Το ερευνητικό Έργο με τίτλο «Συναισθηματική Τεχνητή Νοημοσύνη στη Μουσική Έκφραση» υλοποιείται στο πλαίσιο της δράσης του ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. «Χρηματοδότηση της Βασικής Έρευνας (Οριζόντια υποστήριξη όλων των Επιστημών)» του Εθνικού Σχεδίου Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας «Ελλάδα 2.0» με τη χρηματοδότηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης – NextGenerationEU (Αριθμός Έργου ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ.: 015111).



5. Αναφορές

- [1] Meyer, J., “Directional Characteristics,” *Acoustics and the Performance of Music: Manual for Acousticians, Audio Engineers, Musicians, Architects and Musical Instrument Makers*, pp. 129–177, 2009, doi:10.1007/978-0-387-09517-2_4.
- [2] Grothe, T. and Kob, M., “High resolution 3D radiation measurements on the bassoon,” in *International Symposium on Musical Acoustics (ISMA)*, Detmold, Germany, pp. 139–145, 2019.
- [3] Pätynen, J. and Lokki, T., “Directivities of symphony orchestra instruments,” *Acta Acustica united with Acustica*, 96(1), pp. 138–167, 2010, doi:https://doi.org/10.3813/AAA.918265.
- [4] French, R. M., *Technology of the Guitar*, Springer Science & Business Media, 2012.
- [5] Bissinger, G., “Structural acoustics of good and bad violins,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(3), pp. 1764–1773, 2008.
- [6] Chaigne, A., Cotté, B., and Viggiano, R., “Dynamical properties of piano soundboards,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(4), pp. 2456–2466, 2013.

- [7] Ackermann, D., Brinkmann, F., and Weinzierl, S., "A database with directivities of musical instruments," *Journal of the Audio Engineering Society*, 72, pp. 170–179, 2024.
- [8] Yang, W., Kwak, K.-h., and Seo, C.-k., "Subjective acoustic survey of Korean traditional wind instruments, piri and daegeum, in a concert hall using auralisation techniques," *Applied Acoustics*, 185, p. 108421, 2022.
- [9] Özgencil, Y. and Yü`grük Akda`g, N., "An important parameter in concert hall design: Determination of directivity for instruments." *Megaron*, 17(4), 2022.
- [10] Bakogiannis Konstantinos and Dedousis Giorgos and Malafis Yannis and Andreopoulou, Areti "On the spherical directivity and formant analysis of the singing voice; a case study of professional singers in Greek Classical and Byzantine music," in *153rd Audio Engineering Society Convention*, pp. 1–12, 2022.
- [11] Dedousis, G., Bakogiannis, K., Andreopoulou, A., and Georgaki, A., "Examining the directivity characteristics of Greek sung vowels on formant frequencies," in *Models and Analysis of Vocal Emissions for Biomedical Applications: 13th International Workshop, September, 12-13, 2023*, p. 79, Firenze University Press, 2023.
- [12] Malafis Yannis et.al. *AES 157th Convention, October 2024*
- [13] Katz, Brian and d'Alessandro, Christophe, "Directivity measurements of the singing voice," in *International Congress on Acoustics (ICA 2007)*, pp. 1–6, 2007.
- [14] Bellows, S. D. and Leishman, T. W., "Modeling musician diffraction and absorption for artificially excited clarinet directivity measurements," in *Proceedings of Meetings on Acoustics*, volume 46, AIP Publishing, 2022.