



Ανώτατο
Τεχνολογικό
Εκπαιδευτικό
Ίδρυμα
Κρήτης

Πτυχιακή εργασία:
Μελέτη ακουστικής συμπεριφοράς καπακιών
αντηχείου Τζουρά επεξεργασμένων με χημικές
μεθόδους.

Σπουδαστής: Νικόλαος Σβίγκος

Επιβλέπων Καθηγητής: Νεκτάριος Παπαδογιάννης

Τμήμα Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής
Σχολή Εφαρμοσμένων Επιστημών
Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης

Ρέθυμνο 2019

Περίληψη

Αντικείμενο του παρόντος πονήματος είναι η μελέτη της ακουστικής συμπεριφοράς καπακιών αντηχείου Τζουρά επεξεργασμένων με χημικές μεθόδους. Αφορμή για τη μελέτη αυτή αποτελούν τα αποτελέσματα της έρευνα του Nagyvary et al. (2009). Η έρευνα αυτή υποδεικνύει την ύπαρξη ορυκτών συντηρητικών, μεταξύ των οποίων και βορικό άλας σε όργανα των Stradivari και Guarneri.

Γίνεται μια σύντομη παρουσίαση του Τζουρά και στα μέρη από τα οποία αποτελείται. Στη συνέχεια αναφερόμαστε στην κατασκευή καπακιών αντηχείου τζουρά. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής κατασκευάστηκαν από το συγγραφέα δύο καπάκια και χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Αναφέρονται οι μέθοδοι μελέτης δονήσεων καπακιού. Αναλύεται η μεθοδολογία και η πειραματική διάταξη της τεχνικής ESPI και της ανάλυσης ηχογραφημένου υλικού. Γίνεται αναφορά σε ιστορικά στοιχεία που αφορούν το βόρακα και τη χρήση του ως συντηρητικό από τα αρχαία χρόνια. Διερευνάται η σύσταση του διαλύματος που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων καθώς και η μέθοδος εμποτισμού. Παρουσιάζεται αναλυτικά η πειραματική διαδικασία η οποία χωρίζεται σε δύο σκέλη: α) στη μελέτη των τρόπων δόνησης και β) στη χημική επεξεργασία των του καπακιού. Στη συνέχεια, γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων από τα πειράματα που διεξήχθησαν και αμέσως μετά η ανάλυσή τους.

Στο τελευταίο μέρος γίνεται ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων και η σύγκριση των μεθόδων που ακολουθήθηκαν. Τέλος, προτείνονται πεδία για την περαιτέρω διερεύνηση του αντικειμένου της εργασίας αυτής.

Ευχαριστίες

Για την παρούσα πτυχιακή εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους δήλωναν παρόντες στην εξυπηρέτηση των αναγκών για την ολοκλήρωσή της και πιο συγκεκριμένα:

τον οργανοποιό **Μανώλη Μαρτούλα** για όλες τις γνώσεις και την εμπειρία του, που μου προσέφερε απλόχερα σχετικά με την επιστήμη της κατασκευής μουσικών οργάνων,

τον καθηγητή **Γιάννη Ορφανό** για τη συνεισφορά και τη συνέπειά του πριν, μετά και κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων

και τέλος τον καθηγητή **Νεκτάριο Παπαδογιάννη** για την έμπνευση, την ενθάρρυνση και την καθοδήγησή του.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή.....	4
Κεφάλαιο 1ο.....	5
1. Τα ευρήματα των Joseph Nagyvary, Renald N. Guillemette και Clifford H. Spiegelman.....	5
1.1 Αναλύοντας την χημική σύσταση του ξύλου παλαιών οργάνων	5
1.2 Κίνητρα για έρευνα	7
Κεφάλαιο 2ο.....	8
2. Προετοιμασία εκτέλεσης του πειράματος.....	8
2.1 Σχετικά με το τζουρά	8
2.2 Κατασκευή «καπακιών»	8
Κεφάλαιο 3ο.....	10
3. Μέθοδοι μελέτης δονήσεων καπακιού.....	10
3.1 Οπτικές τεχνικές	11
3.1.1 Ολογραφία	11
3.1.2 Ολογραφική συμβολομετρία	12
3.1.3 Ηλεκτρονική Συμβολομετρία Ψηφίδων - Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI)	12
3.1.3.1 Πειραματική διάταξη και διαδικασία	13
3.2 Ακουστικές Τεχνικές.....	16
3.2.1 Ανάλυση ηχογραφημένου υλικού	16
Κεφάλαιο 4ο.....	16
4. Χημική επεξεργασία.....	16
4.1 Μέθοδοι εμποτισμού	17
4.2 Ο βόρακας.....	17
4.3 Πειραματικός εμποτισμός.....	18
Κεφάλαιο 5ο.....	19
5. Πραγματοποίηση των πειραμάτων.....	19
5.1 Μετρήσεις με τη μέθοδο ESPI	20
5.2 Ηχοβόλιση-ηχογράφηση με πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο.....	21
Κεφάλαιο 6ο.....	22
6. Αποτελέσματα των πειραμάτων και ανάλυση.....	22
6.1 ESPI με διέγερση του καπακιού από ηχείο	23
6.1.1 Καπάκι 1	23
6.1.2 Καπάκι 2	27
6.2 Ανάλυση ηχογραφημένου υλικού	31
Κεφάλαιο 7ο.....	33
7. Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία	33
Αναφορές.....	35
Βιβλιογραφία.....	37

Εισαγωγή

Είναι γνωστό ότι ο ήχος ενός μουσικού οργάνου, που ανήκει στην οικογένεια των εγχόρδων, επηρεάζεται και καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το «καπάκι» του. Αυτό συμβαίνει διότι οι δονήσεις που μεταφέρονται από τις ταλαντευόμενες χορδές, θέτουν σε ταλάντωση το «καπάκι» και αυτό με τη σειρά του τον αέρα που βρίσκεται μέσα στο «σκάφος» του οργάνου. Η συνισταμένη των δονήσεων αυτών δημιουργεί το ακουστικό φάσμα του ήχου που φτάνει στα αυτιά ενός ακροατή. Η αίσθηση που προκαλεί με τη σειρά του ο ήχος, αποτελεί κριτήριο για τα ακουστικά χαρακτηριστικά ενός οργάνου.

Τα ακουστικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των οργάνων είναι αυτά που με τη σειρά τους προσδίδουν κύρος σε ένα οργανοποιό. Οι τεχνικές που χρησιμοποιεί εκείνος δημιουργούν πολλές φορές ένα καλό αποτέλεσμα και σπανιότερα ένα εξαιρετικό αποτέλεσμα. Ως εξαιρετικοί κατασκευαστές εγχόρδων και συγκεκριμένα εγχόρδων οργάνων της οικογένειας του βιολιού χαρακτηρίζονται οι Antonio Stradivari και Joseph Guarneri del Gesù, οι οποίοι έχουν γράψει ιστορία στην κατασκευή οργάνων και οι τεχνικές τους παραμένουν έως σήμερα κρυμμένα μυστικά.

Σε μια προσπάθεια ανακάλυψης των μυστικών των μεγάλων αυτών οργανοποιών, ο J. Nagyvary, έχει πραγματοποιήσει μια σειρά πειραμάτων. Τα αποτελέσματα πειράματος που διεξάχθηκε από τον J. Nagyvary το 2009, έδειξαν ότι τα ξύλα που χρησιμοποιήθηκαν για τα βιολιά του Stradivari και του Guarneri, είχαν υποστεί χημική επεξεργασία. Πιο συγκεκριμένα, η ανάλυση της στάχτης ξύλου που χρησιμοποιήθηκε από τους Stradivari και Guarneri, αποκάλυψε την παρουσία βόρακα και φθορίου. Τα συμπεράσματα οδηγούν στο ότι η χρήση βορικού άλατος πιθανόν να επηρεάζει θετικά την ακουστική των βιολιών.

Στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής, στόχος είναι να διερευνηθούν τα αποτελέσματα του πειράματος του Nagyvary. Για το σκοπό αυτό θα κατασκευαστούν δύο πανομοιότυπα «καπάκια» τζουρά τα οποία θα επιχειρήσουμε να επεξεργαστούμε χημικά με βορικό άλας. Με τη μέθοδο της χρονικά ολοκληρωμένης ηλεκτρονικής συμβολομετρίας ψηφίδων (time-average ESPI), αλλά και με ανάλυση ηχογραφημένου υλικού θα μπορέσουν να παρατηρηθούν και να καταγραφούν οι δονήσεις των «καπακιών», τα οποία στη συνέχεια θα εμβαπτιστούν σε διάλυμα βορικού άλατος. Στην τελευταία φάση του πειράματος θα μετρήσουμε εκ νέου τις δονήσεις των «καπακιών» ώστε να διαπιστωθούν τυχόν μεταβολές.

Κεφάλαιο 1ο

1. Τα ευρήματα των Joseph Nagyvary, Renald N. Guillemette και Clifford H. Spiegelman

Ακολουθώντας τις μάταιες προσπάθειες γενεών για να φτάσουν τα υψηλά στάνταρ τελειότητας των οργανοποιών της Cremona της Ιταλίας, με ποικιλία από σχέδια και κουρδίσματα κατακτών, συγκεκριμένο ενδιαφέρον επικεντρώνεται στις διαφορές των υλικών συστατικών. Το μακροχρόνιο ερώτημα για το κατά πόσο τα ξύλα που χρησιμοποιήθηκαν από τον Stradivari και τον Guarneri είχαν επεξεργαστεί με συντηρητικά ξύλου, μπορεί να απαντηθεί μόνο με την εξέταση δειγμάτων ξύλου από αυτά τα ανεκτίμητα όργανα- αντικείμενα. Το 2006, ο Nagyvary [1] αναφέρθηκε στην υποβάθμιση των πολυμερών του ξύλου σε όργανα του Stradivari και του Guarneri κάτι που μπορεί να εξηγηθεί μόνο με χημική επεξεργασία, πιθανόν με συντηρητικά. Σκοπός της έρευνας του Nagyvary το 2009 [2], ήταν να εντοπιστούν τα ορυκτά από μικρά δείγματα ξύλου σφενδάμου προερχόμενο από παλαιά μουσικά όργανα. Αναλύθηκε η στάχτη από ξύλο που προερχόταν από ένα βιολί και ένα τσέλο του Stradivari, δύο βιολιά του Guarneri, μια βιόλα του H. Jay και ένα βιολί του Gand-Bernardel και συγκρίθηκε με ποικιλία από αντίστοιχα ξύλα του εμπορίου. Και στα τέσσερα όργανα από την Cremona φάνηκαν πέρα από κάθε αμφιβολία ίχνη από χημική επεξεργασία που δεν βρίσκονται σε φυσικά ξύλα. Ένα από αυτά είναι και ο βόρακας. Επίσης, βρέθηκαν αλλαγές στα ορυκτά που υπάρχουν στα κοινά ξύλα. Η στατιστική εκτίμηση 12 ορυκτών, με διακριτή ανάλυση, αποκάλυψε: α. διαφορές ανάμεσα στα τέσσερα όργανα από την Cremona, β. διαφορές ανάμεσα στα όργανα από την Cremona και τα όργανα από Γαλλία και Αγγλία και γ. μόνο τα όργανα από την Cremona διέφεραν από ξύλα του εμπορίου. Αυτά τα ευρήματα μπορεί να δίνουν απάντηση στις αποτυχημένες έως τώρα προσπάθειες ανακατασκευής οργάνων του Stradivari από φυσικό ξύλο.

1.1 Αναλύοντας την χημική σύσταση του ξύλου παλαιών οργάνων

Το 2009 οι Joseph Nagyvary, Renald N. Guillemette και Clifford H. Spiegelman δημοσίευσαν μια εργασία που στόχο είχε να εντοπιστούν υπολείμματα ορυκτών σε μικρά δείγματα από ξύλο σφενδάμου που προερχόταν από πολύ παλαιά μουσικά όργανα. Τα δείγματα αυτά ανήκαν σε ένα βιολί και ένα βιολοντσέλο του Stradivari, σε δύο βιολιά του Guarneri, μια βιόλα του H. Jay κι ένα βιολί του Gand-Bernardel. Στα πλαίσια της έρευνας αυτής, τα προαναφερθέντα δείγματα αναλύθηκαν και συγκρίθηκαν με μια ποικιλία ξύλων του εμπορίου. Στα όργανα των Stradivari και Guarneri φάνηκαν αδιαμφισβήτητα σημάδια χημικής επεξεργασίας υπό τη μορφή χημικών ουσιών που δεν υπάρχουν φυσικά στα ξύλα. Τέτοιες χημικές ουσίες είναι το $BaSO_4$, το CaF_2 , το βορικό άλας και το $ZrSiO_4$.

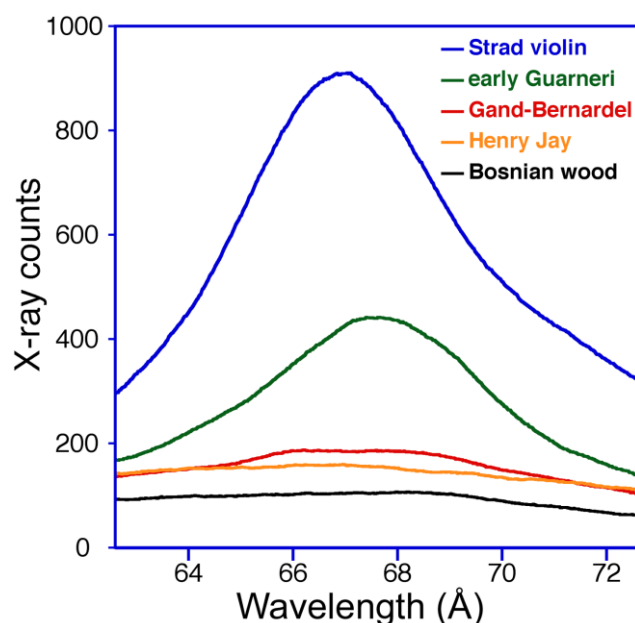
Για πολλά χρόνια, οι κατασκευαστές βιολιών προσπάθησαν μάταια να φτάσουν τα υψηλά στάνταρ που είχαν θέσει κατά το πρώτο μισό του 18ου αιώνα ο Antonio Stradivari και ο Joseph Guarneri del Gesù στην Cremona της Ιταλίας. Δεδομένου ότι οι σύγχρονοι οργανοποιοί έχουν χρησιμοποιήσει όλη την παραδοσιακή τεχνογνωσία και ένα τεράστιο όγκο δεδομένων από την έρευνα της ακουστικής, η αποτυχία τους είναι δύσκολο να εξηγηθεί. Η μηχανικές ιδιότητες του ξύλου από φυσικά αποξηραμένη ερυθρελάτη και σφένδαμο έχουν μελετηθεί από πολλούς ερευνητές [3,4,5] οι οποίοι κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η υψηλή ακαμψία και η χαμηλή πυκνότητα πρέπει να αποτελούν τα κριτήρια επιλογής του καλύτερου ξύλου. Ωστόσο, τα αποτελέσματα από τη χρήση των καλύτερων ξύλων του εμπορίου παρέμειναν μη πειστικά. Είναι

πιθανό ότι, λόγω της φύσης του ξύλου, η δεδομένη αναλογία των μηχανικών σταθερών του, δεν είναι αυτό που θα έπρεπε να είναι ιδανικά για το καλύτερο ακουστικό αποτέλεσμα. Οι εκτιμήσεις αυτές θα μπορούσαν να δικαιολογήσουν την πρόταση ότι τα δέντρα που καλλιεργήθηκαν κατά τη διάρκεια του Maunder Minimum (1645-1715), θα μπορούσαν να είχαν διαφορετικές και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες [6]. Η πρόταση ότι η απάντηση μπορεί να βρίσκεται στις διαφορές στο υλικό που προκαλούνται από μια αρχαία και ξεχασμένη πρακτική στη συντήρηση του ξύλου, έχει εμφανιστεί πολλές φορές, αλλά έλαβε λιγότερη από τη δέουσα προσοχή. Το 1987 η παρουσίαση εγγράφων από το κρατικό αρχείο της Serenissima της Δημοκρατίας της Βενετίας [7] παρείχε ενδείξεις ότι ξυλεία για όλες τις εμπορικές χρήσεις διακινούνταν μέσω των υδάτων και μπορούσε να έχει υποστεί επεξεργασία με χημικά συντηρητικά. Το ευεργετικό αποτέλεσμα των αλάτων στο ξύλο των μουσικών οργάνων έγινε αντιληπτό για πρώτη φορά από τον Γάλλο συγγραφέα Palissy το 1580, σύμφωνα με την ιστορική έρευνα του R. Gug [8]. Το ξύλο που χρησιμοποίησαν οι μεγάλοι οργανοποιοί έτυχε ελάχιστης προσοχής από τους επιστήμονες στο παρελθόν, και η εστίαση ήταν στα υλικά του φινιρίσματος [9,10,11]. Το βερνίκι και το ξύλο ενός τσέλο του Stradivari υποβλήθηκαν σε ανάλυση, αλλά οι ανακρίβειες της μεθόδου δεν επέτρεψαν την εξαγωγή συμπερασμάτων πέρα από την παρουσία ιχνών από στοιχεία. Η πρώτη ένδειξη ότι ολόκληρα τα ξύλα των οργάνων των οργανοποιών της Cremona θα μπορούσαν να έχουν λάβει κάποιο είδος ειδικής υδατικής επεξεργασίας προωθήθηκε από τον Nagyvary [12] μελετώντας δείγματα από ξύλο ερυθρελάτης. Τα δείγματα από τα βιολιά των Stradivari, Guarneri και Guadagnini αποκάλυψαν υπολείμματα μικροοργανισμών και του Guarneri έδειξε επίσης εναποθέσεις ορυκτών.

Σε έρευνες του Nagyvary το 2006 [1] για το ξύλο σφενδάμου από τις πλάτες των οργάνων των Stradivari και Guarneri del Gesù σε σύγκριση με το σφεντάμι από παλαιά γαλλικά και αγγλικά όργανα, βρήκε ότι τα ιταλικά δείγματα αποκάλυψαν τεράστιες χημικές μεταβολές στα πολυμερή του ξύλου ενώ τα άλλα διέφεραν ελάχιστα από το σύγχρονο φυσικό ξύλο. Οι παρατηρούμενες αλλαγές ξεπέρασαν αυτό που θα μπορούσε κανείς να δει μετά από πιθανό βράσιμο ξύλου στο νερό. Έτσι, δεν υπάρχει καμία αμφιβολία ότι αυτά τα συγκεκριμένα ξύλα υποβλήθηκαν σε χημική επεξεργασία και το μόνο ερώτημα αφορά τις ιδιαιτερότητες της χημικής επεξεργασίας.

Τα αποτελέσματα της έρευνας του Nagyvary [1] δείχνουν ότι το ξύλο που χρησιμοποιήθηκε από τον Stradivari και τον Guarneri επεξεργάστηκε πράγματι με συντηρητικά ορυκτών στοιχείων. Μια τέτοια διαδικασία θα μπορούσε να προκαλέσει εκτεταμένη χημική αλλαγή στην δομή του ξύλου κατά συνέπεια, θα μπορούσε να έχει επηρεάσει τις ακουστικές ιδιότητες του ξύλου.

Στην έρευνα του Nagyvary το 2009 [2] δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή σε όλα τα δείγματα για την αναζήτηση βορικού άλατος λόγω του ρόλου του ως εντομοκτόνο-μυκητοκτόνο μακροχρόνιας χρήσης. Βόριο βρέθηκε και στα δύο όργανα του Stradivari και στο όργανο πρώιμης περιόδου του Guarneri. Απουσίαζε στα όργανα ύστερης περιόδου του Guarneri και σε όλα τα δείγματα σφενδάμου του εμπορίου. Η ποσότητα του βορικού άλατος στα όργανα των Gand-Bernardel και ίσως στον Henry Jay ήταν λίγο πιο αυξημένη από τη φυσική συγκέντρωση βόρακα στο ξύλο. Αυτό γίνεται εμφανές στο παρακάτω σχήμα το οποίο δείχνει την συγκέντρωση βόρακα στα δείγματα από τα βιολιά των Stradivari και του Gand-Bernardel, του πρώιμου βιολιού του Guarneri, από τη βιόλα του H. Jay και από δείγματα σύγχρονου σφενδάμου Βοσνίας.



Σχήμα 1.1: Ανίχνευση βορίου. Κορυφές στη συγκέντρωση βορίου μέσω φασματικής σάρωσης σε δείγμα από βιολί Stradivari(μπλε), πρώιμο Guarneri βιολί (πράσινο), βιολί Gand-Bernardel (κόκκινο), βιόλα Henry Jay (πορτοκαλί) και σφεντάμι εμπορίου Βοσνίας (μαύρο). Πηγή: Nagyvary J, Guillemette RN, Spiegelman CH (2009) Mineral Preservatives in the Wood of Stradivari and Guarneri. PLoS ONE 4(1): e4245. doi:10.1371/journal.pone.0004245 pg 5.

Ο Nagyvary και οι συνεργάτες του έχουν κατασκευάσει περίπου 200 βιολιά από ξύλο που έχει υποστεί επεξεργασία με μια ποικιλία χημικών ουσιών, συμπεριλαμβανομένου του βόρακα, μικροοργανισμών και ενζύμων ημικυτταρίνης [13]. Αναμφίβολα, κι άλλοι κατασκευαστές βιολιών ακολούθησαν το παράδειγμά τους. Αυτές οι χημικές επεξεργασίες σχεδιάστηκαν για να μειώσουν την περιεκτικότητα σε ημικυτταρίνη και συνεπώς και την περιεκτικότητα σε υγρασία καθώς και την πυκνότητα [13-15].

Έχει αναφερθεί επίσης από τον Bucur [16] ότι το βράσιμο του ξύλου οδηγεί σε μείωση της πυκνότητάς του, κάτι που είναι ευεργετικό για την ακτινοβολία του ήχου. Σύμφωνα με τον Nagyvary [12], στα πλεονεκτήματα της υδατικής επεξεργασίας του ξύλου περιλαμβάνεται η αύξηση του πορώδους και της διαπερατότητας του ξύλου. Συνοπτικά, αρκετές γραμμές αποδεικτικών στοιχείων υποδηλώνουν ότι το ξύλο των μεγάλων οργανοποιών της Cremona, ήταν διαφορετικό σε χημικό και φυσικό επίπεδο από αυτό των μεταγενέστερων κατασκευαστών.

1.2 Κίνητρα για έρευνα

Μελετώντας τη δημοσίευση για τα αποτελέσματα της έρευνας των Joseph Nagyvary, Renald N. Guillemette και Clifford H. Spiegelman, σκεφτήκαμε πως θα μπορούσαμε να δοκιμάσουμε να κάνουμε χημική επεξεργασία «καπακιού» και να πραγματοποιήσουμε τις απαραίτητες μετρήσεις ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο μπορεί να μεταβληθεί η δομή του ξύλου και τα ακουστικά του χαρακτηριστικά. Για το λόγο αυτό, κατασκευάστηκαν δύο πανομοιότυπα «καπάκια» από έλατο εμπορίου. Τα «καπάκια» σχεδιάστηκαν για τζουρά, με το σκεπτικό της τοποθέτησής τους πάνω στο όργανο, ώστε μελλοντικά να πραγματοποιηθούν μετρήσεις για τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της χημικής επεξεργασίας. Το σχήμα των «καπακιών» ακολουθεί ήδη υπάρχον καλούπι για κατασκευή τζουρά.

Κεφάλαιο 2ο

2. Προετοιμασία εκτέλεσης του πειράματος

Οι λόγοι που επιλέχθηκε ο τζουράς και συγκεκριμένα το καπάκι του ως υποκείμενο για την πραγματοποίηση των πειραμάτων είναι καθαρά πρακτικοί. Η κατασκευή βιολιού ή καπακιών για βιολί αποτελεί μία διαδικασία που απαιτεί γνώση και εμπειρία. Το ίδιο συμβαίνει και με το τζουρά, απλά σε αυτή την περίπτωση η κατασκευή έχει λιγότερη περιπλοκότητα. Στόχος μας άλλωστε, δεν είναι η κατασκευή ενός επαγγελματικού οργάνου, αλλά η κατασκευή ενός μέσου για να διεξάγουμε τα πειράματά μας. Σε αυτό το κεφάλαιο λοιπόν, παραθέτονται επιγραμματικά κάποιες πληροφορίες για το τζουρά και την κατασκευή του καπακιού του. Αυτές οι πληροφορίες, με τη συνεπικουρία ενός οργανοποιού μας βοήθησαν στην ολοκλήρωση της κατασκευής.

2.1 Σχετικά με το τζουρά

Ο τζουράς αποτελεί σύνθεση στοιχείων από την αρχαιοελληνική πανδούρα (μακρύ χέρι) και το αραβικό ούτι (μικρό αχλαδόσχημο ηχείο). Η λέξη πανδούρα ή τρίχορδο είναι αρχαία ελληνική. Με το πέρασμα των χρόνων η πανδούρα εξελισσόταν σε ότι αφορά τα κατασκευαστικά της στοιχεία αλλά και ως λέξη: από πανδούρα μετονομάστηκε σε φανδούρα, θαμπούρα, θαμπούριν, ταμπούριν, ταμπουράν για να μείνει έως και σήμερα ταμπουράς. Την ονομασία ταμπουράς [17] χρησιμοποιεί από πολύ παλιά ο ελληνικός λαός για μια σειρά από τα νυκτά όργανα της οικογένειας του λαγούτου, ανεξάρτητα από τις διαστάσεις, τον αριθμό των χορδών και το κούρδισμά τους. Ο Τζουράς ανήκει στην οικογένεια των εγχόρδων λαϊκών μουσικών οργάνων, με αχλαδόσχημο αντηχείο (σκάφος) από επιμήκεις ξύλινες λουρίδες, τις ντούγιες, και μακρύ βραχίονα, το μπράτσο ή μάνικο με κλειδιά στην άκρη για το κούρδισμα [18]. Για την κατασκευή του χρησιμοποιούνται για το σκάφος ξύλα σκληρά όπως έβενο, παλίσανδρο, σφεντάμι, μουριά, μαόνι, καρυδιά, για το σκελετό του χεριού φλαμούρι ή άλλο μαλακό ξύλο, ενώ για το καπάκι λευκή ξυλεία συνήθως πεύκο ή ερυθρελάτη. Σύμφωνα με το Φοίβο Ανωγειανάκη[17], οι παλιοί οργανοποιοί, τα ξύλα που χρησιμοποιούσαν για την κατασκευή οργάνων τα άφηναν 2-3 χρόνια να ξεραθούν. Οι παλιοί καλοί οργανοποιοί, προτιμούν τη φυσική από την τεχνητή ξήρανση. Η φυσική αφήνει κάποια υγρασία στο ξύλο και αυτή το κρατάει «ζωντανό». Ιδιαίτερα για τα όργανα με καμπύλες που χρειάζονται «σιδέρωμα», όπως το λαγούτο, ο ταμπουράς, η κιθάρα κ.α, το ξύλο τους πρέπει να έχει μια κάποια υγρασία για να μπορεί να δουλεύεται. Ο Φ. Ανωγειανάκης [17] ακόμη αναφέρει ότι εκτός από τη φυσική ξήρανση έβραζαν τα ξύλα μέσα σε νερό και αλάτι και αυτό τα εμπόδιζε να «σκάνε», σύμφωνα με παλιούς κατασκευαστές.

2.2 Κατασκευή «καπακιών»

Το καπάκι θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι το σπουδαιότερο μέρος του οργάνου και αυτό διότι από αυτό τελικά παράγεται ο ήχος. Ακόμη, η ποιότητα του ήχου αλλά και η έντασή του εξαρτώνται από αυτό. Επίσης δένει και σταθεροποιεί το όργανο, καθώς οι δυνάμεις που εμφανίζονται από την τάση των χορδών είναι μεγάλες[19]. Έτσι η παλαιότητα του ξύλου, ο τρόπος κοπής του, τα νερά του, το πάχος του και η τελική του κατεργασία παίζουν καθοριστικό ρόλο στο



Εικόνα 2.1: Τα βασικά μέρη ενός Τζουρά: καπάκι, ταστιέρα, κλειδιέρα ή καράβολας. Το παρών όργανο είναι κατασκευής Νικολάου Σβίγκου 2018. Έχει αχλαδόσχημο σκάφος. Διαθέτει μεπρντέδες αντί για τάστα και στριφτάρια αντί για κλειδιά. Οι μεπρντέδες και τα στριφτάρια χρησιμοποιούνται κυρίως στην παραδοσιακή οργανοποιεία.

τελικό ηχητικό αποτέλεσμα. Λέγοντας τελική κατεργασία εννοούμε εκτός από το πάχος του, τον οπλισμό του (καμάρια), την ενίσχυσή του κάτω από την τρύπα αλλά και την καμπυλότητα την οποία θα του δώσουμε. Θα μπορούσαμε μάλιστα να πούμε ότι η θέση των καμαριών, το πάχος τους, η καμπυλότητά τους και η κατεργασία τους αποτελούν μερικά από τα περιβόητα μυστικά των κατασκευαστών. Παραδοσιακά το καπάκι φτιάχνεται από λευκή ξυλεία και κυρίως από έλατο, αλλά και ο κέδρος δίνει εξαιρετικά ηχητικά αποτελέσματα.

Για τα καπάκια χρησιμοποιήθηκε ένα κομμάτι από έλατο. Τα κομμάτι αυτό κόπηκε στο μέσο του πάχους του. Προκειμένου τα δύο καπάκια να είναι πανομοιότυπα, στο μέτρο του δυνατού γιατί όταν έχεις φυσικά υλικά δεν μπορεί να πετύχεις τέλεια ομοιότητα, χρησιμοποιήθηκε το ίδιο ξύλο και για τα δύο καπάκια. Αρχικά κολλάμε τα δύο αυτά κομμάτια. Για την σωστή κόλληση πρέπει να πλανιστούν οι πλευρές του ξύλου που θα γίνει η ένωση. Το ξύλο θα είναι έτοιμο, όταν ενώσουμε τα δύο αυτά κομμάτια μεταξύ τους από την πλευρά που έχουν πλανιστεί και δούμε ότι δεν υπάρχει κενό μεταξύ τους. Για να ενωθούν σωστά αυτά τα κομμάτια θα πρέπει να εφαρμοστεί πίεση στα δύο κομμάτια από ειδική κατασκευή και για διάρκεια που εξαρτάται από το είδος της κόλλας(ψαρόκολλα ή συνθετική). Εφόσον ολοκληρωθεί η κόλληση, κόβουμε τα καπάκια σύμφωνα με το πατρόν του σκάφους του οργάνου και προχωράμε στην κατασκευή και τοποθέτηση των καμαριών.

Τα νεύρα του καπακιού ή καμάρια, βοηθούν στην αντοχή του καπακιού από την πίεση που ασκούν οι χορδές πάνω του, αλλά και στην ακουστική συμπεριφορά και ταλάντωση των ηχητικών κυμάτων. Κατασκευάζονται συνήθως από το ίδιο υλικό με το καπάκι, δηλαδή από έλατο. Επίσης μας βοηθούν στο να δώσουμε την καμπύλη που χρειάζεται στο καπάκι, ώστε να βελτιωθούν τα ακουστικά του χαρακτηριστικά. Σκοπίμως δεν έγινε η οπή στα καπάκια, διότι αυτό δεν κρίθηκε απαραίτητο στην παρούσα φάση του πειράματος. Στην εικόνα 2.2 φαίνονται οι δύο όψεις του ενός καπακιού. Στην οπίσθια όψη φαίνεται το καμάρι.

Πρέπει να υπογραμμιστεί ότι τα ξύλα που χρησιμοποιήθηκαν, δεν γνωρίζουμε αν είχαν υποστεί κάποια χημική επεξεργασία από το εργοστάσιο παραγωγής τους. Το γεγονός όμως αυτό, δεν επηρεάζει το πείραμα, καθώς εμείς θα μελετήσουμε την επίδραση που θα έχει, αν έχει, η δική μας χημική επεξεργασία, συγκρίνοντας τα πριν και μετά τη διαδικασία. Θα διαπιστώσουμε δηλαδή, αν η μέθοδος της χημικής επεξεργασίας που ακολουθήθηκε, είχε τελικά επίδραση στη σύσταση του ξύλου.



Εικόνα 2.2: Απεικόνιση πρόσθιας και οπίσθιας όψης των καπακιών.

Ακόμα, αξίζει να αναφερθεί ότι προκειμένου να είμαστε σε θέση να κατασκευάσουμε καπάκι για το τζουρά, αναλώθηκαν πολλές ώρες για την κατανόηση του τρόπου που κατασκευάζεται ένα έγχορδο μουσικό όργανο. Από τα ξύλα που επιλέγονται και την κοπή τους, μέχρι τη στιγμή που το όργανο αποκτά «φωνή», μεσολαβεί ένα τεράστιο ταξίδι γνώσης και εμπειριών. Καρπός της προσπάθειας αυτής αποτελεί η κατασκευή του τζουρά της εικόνας 2.1, ο οποίος είναι και το πρώτο μουσικό όργανο κατασκευής του συγγραφέα.

Κεφάλαιο 3ο

3. Μέθοδοι μελέτης δονήσεων καπακιού

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των μεθόδων και των τεχνικών που ακολουθούνται για την μελέτη των δονητικών χαρακτηριστικών των καπακιών. Χρησιμοποιήθηκε μία οπτική και

μία ακουστική τεχνική μέτρησης για τον εντοπισμό των τρόπων ταλάντωσης ενός καπακιού. Η οπτική τεχνική μέτρηση που χρησιμοποιήθηκε ανήκει στην οικογένεια της ολογραφίας. Πιο συγκεκριμένα είναι μια υποκατηγορία της ολογραφικής συμβολομετρίας, η ηλεκτρονική συμβολομετρία ψηφίδων (ESPI) η οποία θα εξηγηθεί στην συνέχεια. Η ακουστική τεχνική που χρησιμοποιήθηκε ήταν η ηχοβόλιση-ηχογράφιση και η μετέπειτα ανάλυση του ηχογραφημένου υλικού.

3.1 Οπτικές τεχνικές

Για την ανάλυση των αντικειμένων χρησιμοποιούνται ευρέως διάφορες οπτικές τεχνικές. Ιδιαίτερα χρήσιμες είναι εκείνες οι οποίες δεν προκαλούν καταστρεπτική ανάλυση των αντικειμένων. Για το λόγο αυτό για την επιτυχημένη χρήση της κατάλληλης τεχνικής, η επιλογή θα πρέπει να βασίζεται στα χαρακτηριστικά του αντικειμένου και στο είδος της ζητούμενης πληροφορίας. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η χρήση της κατάλληλης τεχνικής θα είναι επιτυχημένη γιατί, με τον τρόπο αυτό θα εξασφαλίσουμε κατάλληλες πληροφορίες για το αντικείμενο χωρίς να αλλάξει η κατάστασή του όταν προσπίπτει ένα οπτικό κύμα πάνω του και ακόμη η πληροφορία που θα μεταφέρεται από το οπτικό κύμα να είναι σε πολύ μικρή χωρική κλίμακα, εξαιτίας του μικρού μήκους κύματος του φωτός.

3.1.1 Ολογραφία

Ο Dennis Gabor το 1948 [20] είναι ο πρώτος που επινόησε τον όρο ολογραφία, η οποία προέρχεται από τις λέξεις «όλος» και «γραφή». Η ολογραφία είναι μία τεχνική που δίνει τη δυνατότητα της καταγραφής του πλάτους και της φάσης του ηλεκτρικού πεδίου ενός αντικειμένου αποδίδοντας τη λήψη φωτογραφιών τριών διαστάσεων [21]. Στην απλή φωτογραφία η κατανομή της φωτεινής έντασης ενός τρισδιάστατου αντικειμένου καταγράφεται σε δύο διαστάσεις με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται μια απλή χαρτογράφιση της φωτεινής δέσμης από το φωτογραφικό φιλμ. Με αυτόν τον τρόπο ο παρατηρητής δεν είναι σε θέση να δει το αρχικό αντικείμενο σε τρεις διαστάσεις, σαν να είναι εκείνη τη στιγμή μπροστά του, γιατί το αποτέλεσμα που βλέπουμε στην φωτογραφία δεν είναι πιστή αναπαραγωγή του ηλεκτρικού πεδίου που έχει φωτίσει το αντικείμενο, αλλά μόνο του τετραγώνου του πλάτους του ηλεκτρικού πεδίου αυτού. Για το λόγο αυτό η ολογραφία είναι μία τεχνική που επιτρέπει την καταγραφή τόσο του πλάτους όσο και της φάσης του αρχικού ηλεκτρικού πεδίου αποδίδοντας φωτογραφίες σε τρεις διαστάσεις και προτάθηκε ως τρόπος βελτίωσης των ηλεκτρικών μικροσκοπίων, όπου η αξία και οι δυνατότητές της αξιοποιήθηκαν μετά την εφεύρεση του λέιζερ.

Με αυτόν τον τρόπο λοιπόν καταγράφεται η συνολική πληροφορία για το αντικείμενο σε αντίθεση με την φωτογραφία. Στην τεχνική της ολογραφία απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη μίας δέσμης σύμφωνης ακτινοβολίας (λείζερ), η οποία διαχωρίζεται με έναν διαχωριστή δέσμης σε δύο μέρη για την ταυτόχρονη καταγραφή της φωτεινής έντασης και της φάσης. Το ένα μέρος, το οποίο αποτελεί τη δέσμη αναφοράς, κατευθύνεται απ' ευθείας στο καταγραφικό υλικό (π.χ. μια φωτογραφική πλάκα), ενώ το άλλο μέρος, το οποίο αποτελεί τη δέσμη αντικειμένου, φωτίζει το αντικείμενο που είναι προς ολογράφιση. Το σκεδαζόμενο φως του αντικειμένου μαζί με την δέσμη αναφοράς συμβάλλουν πάνω στην φωτογραφική πλάκα και δημιουργούν χαρακτηριστικό διάγραμμα συμβολής που αποτελείται από κροσσούς συμβολής, που περιέχουν μία πλήρης καταγραφή του αρχικού αντικειμένου και οι τυχόν παρεκκλίσεις του (π.χ. λόγω κίνησης) να αποδίδονται σε διαφορές φάσης στην δέσμη του αντικειμένου.

Αν η εμφανισμένη πλάκα λάβει την αρχική της θέση, δηλαδή τη θέση όταν εκτέθηκε στο φως, και το αντικείμενο προς ολογράφηση απομακρυνθεί, τότε όταν η πλάκα φωτιστεί με δέσμη ανακατασκευής ίδια με την δέσμη αναφοράς, το αρχικό αντικείμενο ανακατασκευάζεται πλήρως σε ένταση και φάση και το είδωλο εμφανίζεται τρισδιάστατο. Το φαινόμενο αυτό πραγματοποιείται λόγω της περίθλασης της δέσμης ανακατασκευής από το διάγραμμα συμβολής της φωτογραφικής πλάκας που καταγράφεται, με αποτέλεσμα παρατηρώντας το αντικείμενο από διαφορετικά σημεία να μας δίνει την εντύπωση, ότι το αντικείμενο περιστρέφεται, ακριβώς όπως εάν ήταν ακόμη εκεί.

3.1.2 Ολογραφική συμβολομετρία

Η τεχνική της ολογραφικής συμβολομετρίας [22,23] αποτελεί μία από τις σημαντικές τεχνικές μελέτης των αλλαγών της επιφάνειας αντικειμένων, αφού μας δίνει τη δυνατότητα να προβούμε στην συμβολομετρική ανάλυση στατικών και δυναμικών αλλαγών μιας οπτικά ανώμαλης επιφάνειας και αυτό αποτελεί το σημαντικό της πλεονέκτημα έναντι της κλασσικής συμβολομετρίας, η οποία υποστηρίζει ότι η μελέτη των αλλαγών αυτών θα πρέπει να στηρίζεται σε επιφάνεια οπτικά ομαλή.

Η ολογραφική καταγραφή μιας σκεδάζουσας επιφάνειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση της κίνησής της και να εμφανίζεται με τρεις τρόπους. Την τεχνική ολογραφικής συμβολομετρίας απλής έκθεσης, την τεχνική διπλής έκθεσης και την χρονικά ολοκληρωμένη μέθοδο. Όπως αναφερθήκαμε παραπάνω, το επεξεργασμένο ολόγραμμα δίνει τη δυνατότητα ανακατασκευής ενός φανταστικού ειδώλου του αρχικού αντικειμένου. Αν το αντικείμενο υποστεί μία μικρή στατική μετατόπιση, ικανή να δημιουργήσει μια μικρή διαφορά φάσης μεταξύ των δύο κυματομετώπων, τότε έχουμε την παρουσία κροσσών συμβολής.

Μια άλλη παραλλαγή είναι η τεχνική της διπλής έκθεσης, όπου αρχικά καταγράφεται ολόγραμμα του αρχικού αντικειμένου, και στη συνέχεια και πριν την επεξεργασία του ολογράμματος, το ολόγραμμα εκτίθεται στο φως από το μετατοπισμένο αντικείμενο. Το αποτέλεσμα είναι δύο επικαλυπτόμενα ανακατασκευασμένα κύματα, τα οποία δίνουν κροσσούς συμβολής, χαρακτηριστικούς της μετατόπισης του αντικειμένου (δηλαδή της διαφοράς στον οπτικό δρόμο).

Μια τρίτη παραλλαγή, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για τη μελέτη γρήγορα ταλαντούμενων αντικειμένων με μικρό πλάτος ταλάντωσης, είναι η χρονικά ολοκληρωμένη μέθοδος. Στην τεχνική αυτή η φωτογραφική πλάκα εκτίθεται στο φως για σχετικά μεγάλο χρόνο, κατά τον οποίο το δονούμενο αντικείμενο έχει εκτελέσει έναν αριθμό ταλαντώσεων. Το ολόγραμμα που προκύπτει μπορεί να θεωρηθεί ως η υπέρθεση πολλαπλών εικόνων, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός σχήματος στάσιμου κύματος.

3.1.3 Ηλεκτρονική Συμβολομετρία Ψηφίδων - Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI)

Η ιστορική εξέλιξη της τεχνικής ESPI ξεκινάει έπειτα από ένα χρόνο εισαγωγής της ιδέας της συμβολής δύο σύμφωνων πεδίων τυχαίας φάσης πριν και μετά την παραμόρφωση ενός αντικειμένου [23,24,25], κατά την χρονική περίοδο του 1971. Η συγκεκριμένη τεχνική σημείωσε ιδιαίτερη σημαντικότητα και ανάπτυξη μετά την εισαγωγή της πειραματικής τεχνικής της ελεγχόμενης μετατόπισης φάσης και της ψηφιακής ανάλυσης κροσσών με ηλεκτρονικό υπολογιστή

[26], σημειώνοντας αξιόλογη ερευνητική δραστηριότητα σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο. Σήμερα αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές συμβολομετρικές τεχνικές στη μελέτη δονήσεων ή παραμορφώσεων αντικειμένων.

Η τεχνική ESPI [27] ανήκει στις τεχνικές ψηφιακής συμβολομετρίας ψηφίδων, η οποία αποτελεί μία σημαντική κατηγορία μέσα από την ύπαρξη πληθώρας μη καταστρεπτικών συμβολομετρικών τεχνικών όπως TV holography, electronic holography, phase-shifting speckle pattern interferometry. Η κατηγορία της συμβολομετρίας ψηφίδων χρησιμοποιείται σαν όρος όταν ένα από τα συμβάλλοντα πεδία είναι ένα πεδίο ψηφίδων, το οποίο προκύπτει από την ανάκλαση φωτός από μια οπτικά ανώμαλη επιφάνεια. Η λέξη «ψηφίδα» περιγράφει την διάστικτη, κοκκιδωτή και τυχαία φύση της κατανομής έντασης του ανακλώμενου φωτός, όπως αυτή παρατηρείται σε κάποια απόσταση από το αντικείμενο. Η τεχνική ESPI συνδέεται σημαντικά με την ολογραφική συμβολομετρία, αφού και οι δύο τεχνικές παρέχουν την ίδια ευαισθησία, ωστόσο η τεχνική E.S.P.I. απλουστεύει την πειραματική διαδικασία δίχως να απαιτεί την καταγραφή ολογράμματος και με την χρήση της κάμερας ως ψηφιακό καταγραφικό δίνει τη δυνατότητα και το πλεονέκτημα καταγραφής και ταυτόχρονης απεικόνισης των κροσσών σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, η καταγραφή των κροσσών με την τεχνική E.S.P.I. είναι λιγότερο ευκρινείς σε σχέση με την ολογραφική συμβολομετρία.

Στο Εργαστήριο Ακουστικής και Οπτικής Τεχνολογίας χρησιμοποιείται η μέθοδος της χρονικά ολοκληρωμένης ηλεκτρονικής συμβολομετρίας ψηφίδων (time-average ESPI) [28-32]. Μέσω της μεθόδου αυτής μπορούν να παρατηρηθούν και να καταγραφούν οι δονήσεις των καπακιών και να υπολογιστεί το πλάτος ταλάντωσης της δονούμενης επιφάνειας που μελετάται κάθε φορά. Αυτό επιτυγχάνεται με την λήψη ασπρόμαυρων φωτογραφιών όπου μέσω διαβαθμίσεων του γκρι, προσδιορίζονται τα ζητούμενα στοιχεία για τους τρόπους δόνησης των αντικειμένων που μελετώνται.

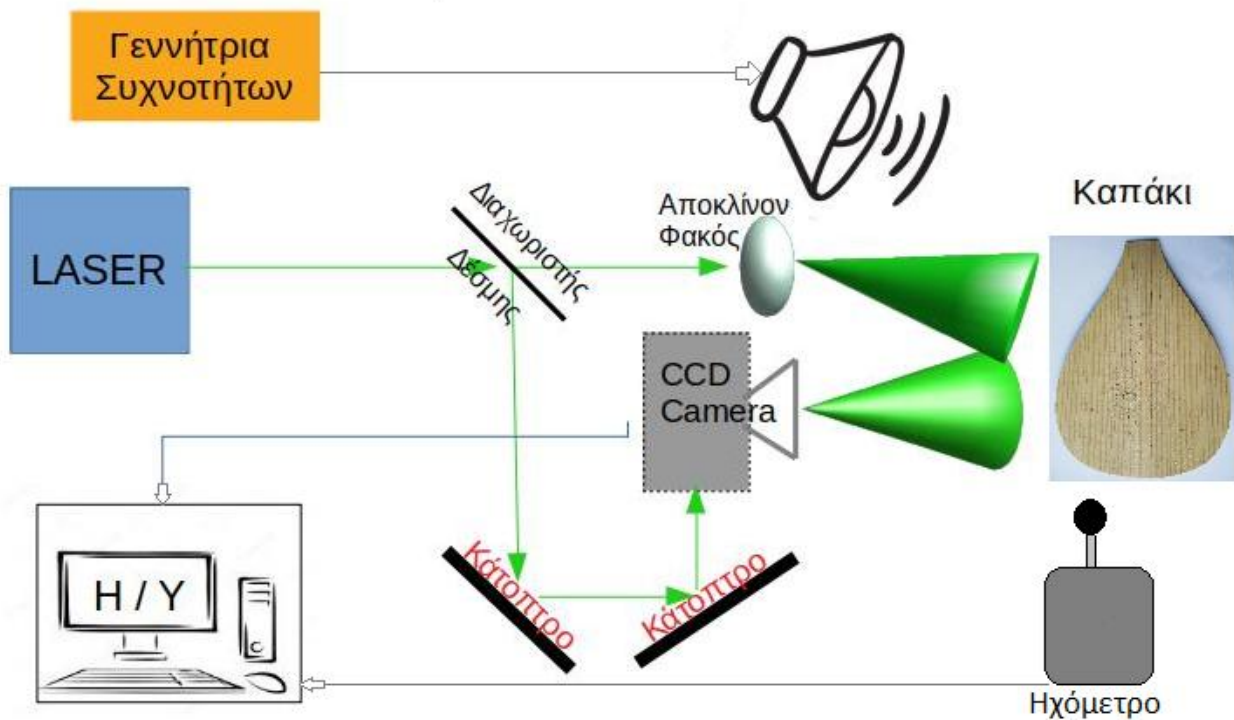
Περιγραφικά, η βασική διάταξη E.S.P.I. περιλαμβάνει την καταγραφή δύο δεσμών λέιζερ σε μία CCD κάμερα, από τις οποίες η μία προέρχεται από ανάκλαση στην υπό εξέταση δονούμενη επιφάνεια (δέσμη αντικειμένου) και η άλλη είναι αναπόσπαστο κομμάτι της αρχικής δέσμης λέιζερ που οδηγείται απ' ευθείας στην CCD κάμερα (δέσμη αναφοράς). Όλη η τεχνική είναι μία διαδικασία αφαίρεσης ή πρόσθεσης διαδοχικών εικόνων που καταγράφονται καθώς το αντικείμενο μετακινείται. Η χρονικά ολοκληρωμένη E.S.P.I. χρησιμοποιείται για την μελέτη περιοδικών αρμονικών παραμορφώσεων, όπου τα δεδομένα λαμβάνονται με την μορφή τηλεοπτικών καρέ με μεγάλους χρόνους έκθεσης σε σχέση με την περίοδο κίνησης.

Η χρονικά ολοκληρωμένη E.S.P.I. χρησιμοποιείται για την μελέτη περιοδικών αρμονικών παραμορφώσεων, όπου τα δεδομένα λαμβάνονται με την μορφή τηλεοπτικών καρέ με μεγάλους χρόνους έκθεσης σε σχέση με την περίοδο κίνησης. Παρακάτω, για την καλύτερη κατανόηση, περιγράφεται λεπτομερώς η πειραματική διάταξη και η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη μελέτη των δονήσεων των καπακιών μουσικών οργάνων.

3.1.3.1 Πειραματική διάταξη και διαδικασία

Στο σχήμα που ακολουθεί αναπαρίσταται η διάταξη ESPI του Εργαστηρίου Ακουστικής και Οπτικής Τεχνολογίας του Τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής στο Ρέθυμνο, και ο

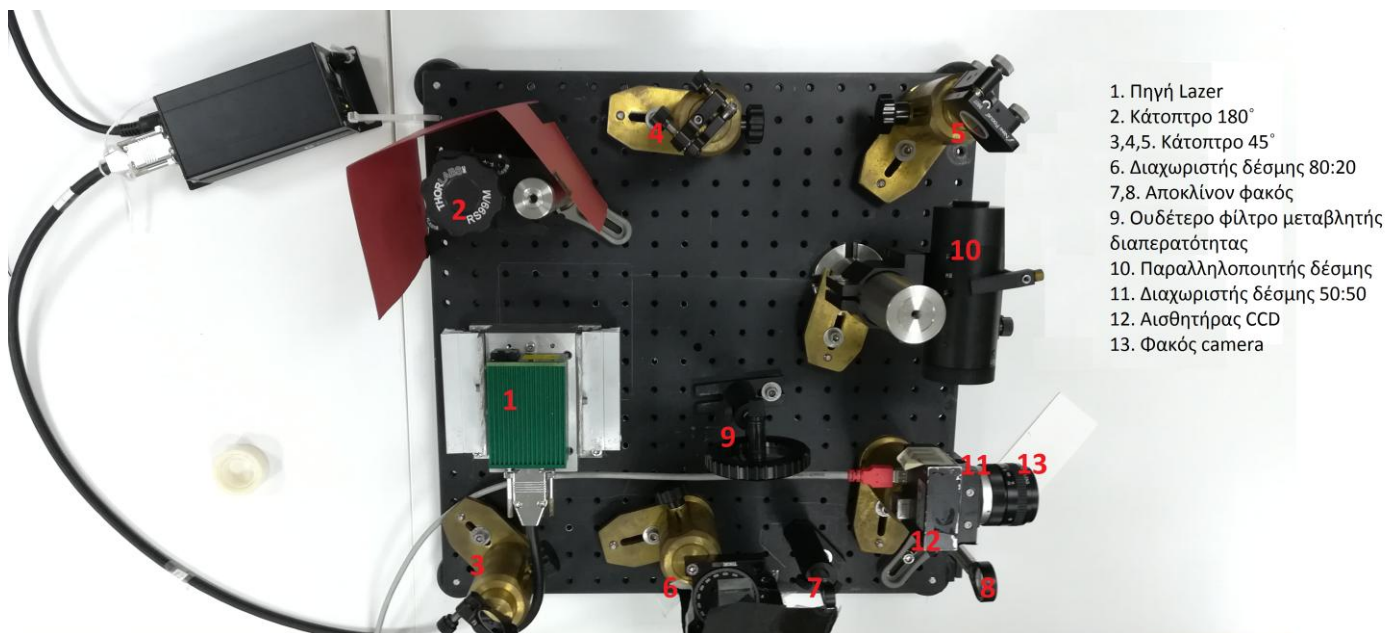
τρόπος με τον οποίο εφαρμόζεται η συγκεκριμένη μέθοδος αναλύεται παρατηρώντας το σχήμα αυτό. Σε πρώτο στάδιο το υπό μελέτη αντικείμενο, το καπάκι εν προκειμένω, στηρίζεται σε μεταλλική βάση όπου στα άκρα της υπάρχει απορροφητικό ελαστικό υλικό. Η βάση αυτή είναι εγκατεστημένη σε σταθερό τραπέζι.



Σχήμα 3.2: Σχηματική αναπαράσταση της πειραματική διάταξης.

Πηγή λέιζερ, συνεχούς μήκους κύματος (cw), στερεάς κατάστασης διοδικής άντλησης Nd:YAG, ενεργού που υλικού εκπέμπει φωτεινή ακτινοβολία πράσινου φώτος με μήκος κύματος $\lambda = 532 \text{ nm}$ και μέγιστη ισχύς 150mW πάνω σε ένα διαχωριστή δέσμης 80:20 διαχωρίζοντας την δέσμη ακτινοβολίας σε δύο συνιστώσες, μια με 80% η οποία φέρεται ως δέσμη αντικειμένου και μία με 20% της αρχικής εκπεμπόμενης ακτινοβολίας η οποία φέρεται ως δέσμη αναφοράς. Η δέσμη αντικειμένου με ποσοστό 80% διέρχεται μέσω ενός αποκλίνον φακού με ως απώτερο σκοπό να μεγεθύνει ή σμικρύνει τη δέσμη ακτινοβολίας ώστε καλυφθεί όλη η υπό μέτρηση επιφάνεια και στη συνέχεια προσπίπτει πάνω στο υπό μέτρηση κρουστό. Η δέσμη αναφοράς διέρχεται μέσω ενός ουδέτερου φίλτρου μεταβλητής διαπερατότητας, ώστε να έχουμε τον πλήρη έλεγχο της σχετικής του έντασης και μέσω κάποιων κατόπτρων οδηγείται στην CCD camera. Για την ομοιόμορφη κατανομή της έντασης πάνω στον αισθητήρα της CCD camera παρεμβάλλεται ένας παραλληλοποιητής, μεγεθυντής X20. Η CCD camera που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή έχει μέγεθος αισθητήρα $1392 \times 1040 \text{ pixels}$, μέγεθος pixel $6.45 \times 6.45 \mu\text{m}$ μέγιστο ρυθμό καταγραφής 15frames/sec και διαθέτει ένα κατάλληλο φακό συλλογής φώτος F1,4. Η σύνδεσή της με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή γίνεται μέσω πρωτοκόλλου firewire. Επειδή η δέσμη αναφοράς έρχεται κάθετη από τον παραλληλοποιητή προς την κάμερα τοποθετήθηκε στο εσωτερικό της, ανάμεσα από τον φακό και τον αισθητήρα, ένας διαχωριστής δέσμης 50:50 ώστε οι δύο δέσμες να προσπίπτουν τελικά ευθυγραμμισμένες και οι δύο μαζί πάνω στον αισθητήρα.

Η διέγερση των καπακιών έγινε με ηχοβόλιση. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα γρήγορο σε μεταβολές, τόσο της έντασης όσο και της συχνότητας, ηχείο. Έτσι χρησιμοποιήθηκε το ηχείο της εταιρίας Genelec μοντέλο 8030 arm. Για την παραγωγή του εκπεμπόμενου ήχου χρησιμοποιήθηκε γεννήτρια συχνοτήτων (Siglent SDG830) η οποία ήταν παράλληλα συνδεδεμένη με το ηχείο και με ένα παλμογράφο (Phonic PAA3). Το εύρος συχνοτήτων περιορίστηκε στα 50 έως 2000 Hz και το πλάτος της τάσης διέγερσης δεν ξεπέρασε τα 2.5V. Για την καλύτερη απεικόνιση των χαρακτηριστικών του ηχείου έγινε μία μέτρηση περί της συχνοτικής του απόκρισης σε αυτές τις τάσεις διέγερσης. Για τον έλεγχο της έντασης του ήχου, τοποθετήθηκε ηχόμετρο τύπου Phonic paa3, δίπλα στο υπό εξέταση καπάκι και συνδέθηκε με τον υπολογιστή.



1. Πηγή Laser
2. Κάτοπτρο 180°
- 3,4,5. Κάτοπτρο 45°
6. Διαχωριστής δέσμης 80:20
- 7,8. Αποκλίνον φακός
9. Ουδέτερο φίλτρο μεταβλητής διαπερατότητας
10. Παράλληλοποιητής δέσμης
11. Διαχωριστής δέσμης 50:50
12. Αισθητήρας CCD
13. Φακός camera

Εικόνα 3.1: Η πειραματική διάταξη ESPI του Εργαστηρίου Ακουστικής και Οπτικής Τεχνολογίας.

Για την στήριξη των καπακιών χρησιμοποιήθηκε ειδικά κατασκευασμένη βάση στήριξης με ειδικό απορροφητικό υλικό τοποθετημένο στα σημεία στήριξης, ώστε να απομονώνονται τυχόν κραδασμοί από τη βάση στήριξης προς τα καπάκια. Η απουσία ανεπιθύμητων κραδασμών από το περιβάλλον διαπιστώθηκε και πειραματικά, χωρίς διέγερση, καθώς η τεχνική ESPI είναι ευαίσθητη σε πολύ μικρές μετατοπίσεις. Το ηχείο τοποθετήθηκε σε απόσταση 40 cm από το αντικείμενο μέτρησης, ώστε να μην είμαστε μέσα στο εγγύς πεδίο του ηχείου και με όσο τον δυνατόν μικρότερη γωνία ακτινοβολίας. Επίσης τοποθετήθηκαν σε αντίστοιχο ύψος τα δυο κέντρα, ώστε να συμπίπτουν το ένα κέντρο με το άλλο.

Ένας υπολογιστής λειτουργεί ως σύστημα καταγραφής και επεξεργασίας των δεδομένων που εξάγονται από την ψηφιακή κάμερα. Η ηλεκτρονική καταγραφή, επεξεργασία και αποθήκευση των δεδομένων (εικόνων) γίνεται σε πραγματικό χρόνο. Αυτό που ουσιαστικά γίνεται είναι χρονική συσχέτιση των φωτεινών εντάσεων που καταγράφει η κάμερα (ανακλώμενης και αναφοράς). Όταν γίνει μία εγκάρσια μορφολογική μεταβολή του αντικειμένου που εκτίθεται για μελέτη (αρχίσει να ταλαντώνεται) τότε και η φωτεινή ένταση που καταγράφει η κάμερα από την ανακλώμενη φωτεινή δέσμη θα έχει μεταβληθεί ως προς την δέσμη αναφοράς ανάλογα με την μεταβολή του αντικειμένου. Η μεταβολή της φωτεινής δέσμης ανάκλασης σε συμβολή με την ένταση αναφοράς εμφανίζεται με την μορφή κροσσών συμβολής και διαβαθμίσεων του γκρι στις φωτογραφίες των υπό μελέτη αντικειμένων.

Η πειραματική διαδικασία για την μελέτη των καπακιών με την τεχνική ESPI πραγματοποιήθηκε ως εξής: αρχικά γίνεται οπτική ευθυγράμμιση και ρυθμίζονται οι σχετικές εντάσεις των δεσμών αναφοράς και αντικειμένου στον αισθητήρα της κάμερας. Η εικόνα καταγράφεται συνεχώς καθώς αλλάζει η συχνότητα διέγερσης. Η συχνότητα διέγερσης μεταβάλλεται κατά μικρά βήματα (περίπου 5 Hz), ενώ σε κάθε συχνότητα καταγράφονται αρκετές εικόνες. Όταν η συχνότητα διέγερσης πλησιάζει μια συχνότητα συντονισμού του οργάνου εμφανίζονται κροσσοί, με τον αριθμό τους να μεγιστοποιείται (μέγιστο πλάτος ταλάντωσης) ακριβώς στη συχνότητα συντονισμού. Με αυτόν τον τρόπο προσδιορίζονται ακριβώς οι ιδιοσυχνότητες με το αντίστοιχο εύρος ζώνης τους και καταγράφονται οι αντίστοιχες ιδιομορφίες κατανομής του πλάτους ταλάντωσης της επιφάνειας. Τα αποτελέσματα της τεχνικής ESPI παρουσιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο.

3.2 Ακουστικές Τεχνικές

3.2.1 Ανάλυση ηχογραφημένου υλικού

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής γίνεται ηχοβόλιση του καπακιού και ηχογραφείται το αποτέλεσμα αυτής. Χρησιμοποιήθηκε monitor ηχείο συχνοτικής απόκρισης (+3-4 dB από τα 60Hz έως τα 16KHz) της εταιρίας Genelec. Το ηχείο εκπέμπει sweep tone και με πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο καταγράφονται οι δονήσεις σε συγκεκριμένα σημεία.

Το ηχείο τοποθετήθηκε σε απόσταση 40 cm από το καπάκι και σε ύψος τέτοιο ώστε να βρίσκεται το κέντρο του κώνου του απέναντι από το κέντρο του καπακιού. Η στάθμη της έντασης διατηρήθηκε σταθερή για όλες τις μετρήσεις. Για τον συνεχή έλεγχο της στάθμης της έντασης χρησιμοποιήθηκε ηχώμετρο (Phonic paa3) το οποίο ήταν τοποθετημένο δίπλα από το καπάκι και συνδεδεμένο με τον υπολογιστή. Η ηχογράφηση πραγματοποιήθηκε μέσω πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου της εταιρίας Schaller Oyster. Οι καταγραφές ήχου έγιναν μέσω του περιβάλλοντος Audacity και ως κάρτα ήχου χρησιμοποιήθηκε το Zoom H4n. Η επεξεργασία και η ανάλυση του ηχογραφημένου υλικού έγινε μέσω του περιβάλλοντος Room Eq Wizard. Από το ίδιο λογισμικό έγινε και η εξαγωγή γραφημάτων της συχνοτικής απόκρισης των καπακιών.

Κεφάλαιο 4ο

4. Χημική επεξεργασία

Το ζήτημα της συντήρησης του ξύλου απασχολεί την ανθρωπότητα εδώ και πολλούς αιώνες. Η χημική επεξεργασία του ξύλου είναι ο βασικός τρόπος συντήρησης. Το ξύλο μπορεί να προστατευτεί από βιολογικούς παράγοντες αλλοίωσης [33], όπως είναι οι μύκητες, τα έντομα, οι

θαλασσινοί ξυλοφάγοι οργανισμοί, φωτιά κ.λπ. με προστατευτικό εμποτισμό, δηλαδή εισαγωγή κατάλληλων συντηρητικών χημικών ουσιών μέσα στη μάζα του. Όσο πιο μεγάλη είναι η διαπερατότητα του ξύλου τόσο και πιο εύκολος και αποτελεσματικός είναι ο εμποτισμός του (τα εμποτιστικά υγρά διεισδύουν σε μεγαλύτερο βάθος μέσα στο ξύλο και οι ποσότητες που συγκρατούνται από αυτό είναι μεγαλύτερες). Τα διάφορα ξύλα δεν εμποτίζονται με την ίδια ευκολία. Το είδος του συντηρητικού, η ποσότητα του συντηρητικού που συγκρατείται και το βάθος διεισδύσεως του συντηρητικού μέσα στο ξύλο είναι καθοριστικοί παράγοντες για την αποτελεσματικότητα του εμποτισμού σε κάθε συγκεκριμένη χρήση. Ο κυριότερος παράγοντας που επηρεάζει τη συγκράτηση και τη διείσδυση είναι η δομή του ξύλου επειδή η είσοδος και η κίνηση του συντηρητικού μέσα στο ξύλο εξαρτάται κυρίως από τα δομικά χαρακτηριστικά του που αποτελούν δίοδο για το συντηρητικό υγρό. Η δομή του ξύλου έχει σημασία και για την ευκολία ή δυσκολία κίνησης των διαφόρων τύπων συντηρητικών υγρών μέσα στο ξύλο.

Οι χημικές ουσίες [34] που χρησιμοποιούνται για τον εμποτισμό του ξύλου διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες από τις οποίες οι σπουδαιότερες είναι τα έλαια και τα υδατοδιαλυτά εμποτιστικά. Στην κατηγορία των υδατοδιαλυτών εμποτιστικών υπάγονται διάφορα άλατα ή οξείδια αλάτων του βορίου, χρωμίου, ψευδαργύρου, χαλκού κ.α. Ο συνδυασμός των αλάτων αυτών μας δίνει πολύ αποτελεσματικά εντομοκτόνα μυκητοκτόνα συντηρητικά του ξύλου, τα οποία βρίσκουν παγκόσμια χρήση. Τα πλέον ασφαλή από τα άλατα αυτά είναι τα βορικά άλατα (γνωστά ως άλατα CCB) και τα άλατα χαλκού.

4.1 Μέθοδοι εμποτισμού

Οι πιο αποτελεσματικές μέθοδοι εμποτισμού [34] του ξύλου είναι αυτές που γίνονται σε κλειστό κύλινδρο με άσκηση πίεσης και κενού μέσα στον κύλινδρο. Με τον τρόπο αυτό το υγρό εμποτιστικό εισχωρεί μέσα στα κενά του ξύλου και έτσι επιτυγχάνεται πλήρης προστασία του ξύλου. Η μέθοδος αυτή είναι η πιο αποτελεσματική και επιβάλλεται σε εξωτερικές εφαρμογές του ξύλου και ειδικότερα όταν η κατασκευή μας έρχεται σε επαφή με το έδαφος ή το νερό ή είναι μέσα στο έδαφος. Όταν η κατασκευή μας δεν κινδυνεύει από μύκητες, τότε μπορεί να εφαρμοσθεί ο εμποτισμός του ξύλου με τη μέθοδο της απλής εμβάπτισης. Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά διαδεδομένη στην ελληνική αγορά για κατασκευές στεγών, όπου χρησιμοποιούνται τα βορικά άλατα. Αυτό που θα πρέπει να γνωρίζουμε είναι ότι το εμβαπτισμένο ξύλο έχει μόνο επιφανειακή επάλειψη και όχι σε βάθος, σε αντίθεση προς το εμποτισμένο υπό πίεση που παρέχει απόλυτη προστασία.

4.2 Ο βόρακας

Ο βόρακας $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, είναι ένυδρο ορυκτό του Βορίου [35] και το συναντάμε με τη μορφή λευκής σκόνης. Το όνομά του προέρχεται από την αραβική λέξη buraq. Η βασική του δομή συνίσταται από τριγωνικά συμπλέγματα $\text{BO}_2(\text{OH})$ και τετράεδρα $\text{BO}_3(\text{OH})$, τα οποία συνδέονται με αλυσίδες νατρίου και οκτάεδρα κρυσταλλικού νερού. Συνηθέστερο χρώμα του είναι το λευκό, χαρακτηριστική, όμως, είναι η γεύση του, η οποία είναι υπόγλυκη μεταλλική. Το από πότε ο άνθρωπος γνωρίζει και χρησιμοποιεί τον βόρακα δεν είναι δυνατόν να διευκρινιστεί.

Εικάζεται πως οι Βαβυλώνιοι έφεραν τον βόρακα από την Άπω Ανατολή εδώ και τουλάχιστον 4.000 χρόνια. Εκεί υπήρχε άφθονος βόρακας στις δυσπρόσιτες ξηρές λίμνες των υψιπέδων του Θιβέτ, σε υψόμετρα 4000-4500 μέτρων, απ' όπου ποσότητες του μεταφέρονταν με καραβάνια στην Ινδία, με την ονομασία *tinca*, η οποία είναι σε χρήση μέχρι και σήμερα και δηλώνει ακάθαρμο, ανεπεξέργαστο βόρακα. Σε κείμενα αναφέρεται ότι τον χρησιμοποιούσαν οι χρυσοχόοι, χάρις στην ιδιότητα του τηγμένου βόρακα, να διευκολύνει τη συγκόλληση τεμαχίων χρυσού ή χρυσού με χαλκό, εξ ου και μια από τις μετέπειτα ονομασίες του: *chrysocola*. Οι αρχαίοι Αιγύπτιοι χρησιμοποιούσαν τον βόρακα τόσο στη μεταλλουργία, όσο και στην ιατρική όπως επίσης και στην ταρίχευση των νεκρών τους, χωρίς ωστόσο το τελευταίο να έχει τεκμηριωθεί. Βορικά άλατα και βορικό οξύ χρησιμοποιούσαν οι αρχαίοι Έλληνες κυρίως για καθαρισμούς και ως συντηρητικό τροφίμων λόγω της χαμηλής τοξικότητάς του και της αντισηπτικής δράσης του. Σε κινεζικά κεραμικά αντικείμενα του 300 μ.Χ. διαπιστώθηκε η χρήση βόρακα στα υαλώματα (σμάλτα, glazes), ενώ η χρησιμότητα αυτή του βόρακα περιγράφεται από Άραβες αλχημιστές από το 700 μ.Χ. Η χρήση αυτή βασίζεται στην ιδιότητα του τηγμένου βόρακα να διαλυτοποιεί μεταλλικά οξείδια αποκτώντας διαφορετικά χρώματα (βλ. παρακάτω: "μαργαρίτες βόρακα"). Ο Ιταλός περιηγητής και έμπορος Marco Polo (1254-1324) έφερε από την Κίνα στην Ιταλία κάποια δείγματα από τα υαλώματα βόρακα κατά τον 13ο αιώνα.

Το βορικό οξύ (H_3BO_3) και τα άλατά είναι πολύ αποτελεσματικά για τον έλεγχο και καταστροφή εντόμων και μυκήτων, ενώ δεν είναι επικίνδυνα για τα θηλαστικά. Είναι τοξικά για κατσαρίδες, μυρμήγκια, τερμίτες, σκαθάρια, ψύλλους και κάμπιες. Για τους παραπάνω λόγους χρησιμοποιείται ως συντηρητικό ξύλου.

4.3 Πειραματικός εμποτισμός

Η ηλεκτρονική βιβλιογραφία σχετικά με τη παρασκευή διαλυμάτων βορικού άλατος ως συντηρητικό ξύλου είναι συγκεχυμένη. Οπότε, βασιζόμενοι σε πληροφορίες από διάφορες πηγές του διαδικτύου παρασκευάσαμε ένα κορεσμένο διάλυμα. Δηλαδή, έγινε προσπάθεια ώστε να διαλυθεί η μεγαλύτερη δυνατή ποσότητα βόρακα μέσα στο νερό, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι διάφορες συνταγές από τις οποίες εμπνευστήκαμε για την παρασκευή του διαλύματος, αναφέρουν και προσθήκη βορικού οξέος. Η παρουσία του βορικού οξέος αυξάνει τη διαλυτότητα και καθώς είναι πολύ ανίσχυρο οξύ, δε φαίνεται να αποτελεί κίνδυνο για το ξύλο. Παρόλα αυτά, εφόσον δεν υπήρχε εμπειρία πάνω στο ζήτημα και καθώς η χημεία είναι έξω από το επιστημονικό μας πεδίο προτιμήσαμε να μη χρησιμοποιήσουμε βορικό οξύ στο διάλυμα. Ένας ακόμη λόγος που συνέτεινε σε αυτή την απόφαση ήταν το να μην προστεθεί μια ακόμη παράμετρος κατά τη διεξαγωγή του πειράματος.

Για τη διεξαγωγή του πειράματος ακολουθήσαμε δύο τρόπους ώστε να επιτύχουμε τον εμποτισμό του ξύλου. Στην πρώτη περίπτωση φτιάξαμε διάλυμα βορικού άλατος 6% w/v (kg/l) και τοποθετήσαμε το ένα καπάκι μέσα για διάστημα 24 ωρών. Στη δεύτερη περίπτωση επιχειρήσαμε ένα πιο "βίαιο" τρόπο για να επιτύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Τοποθετήσαμε το δεύτερο καπάκι στο ίδιο διάλυμα με το προηγούμενο και το ζεστάναμε μέχρι να βράσει, οπότε και το αφήσαμε στη συνέχεια να κρυώσει. Στη δεύτερη περίπτωση, έφυγε με το βράσιμο η κόλλα από το καπάκι, οπότε χρειάστηκε να κολληθεί ξανά.

Στη συνέχεια, τοποθετήσαμε τα δύο καπάκια σε φούρνο, σε θερμοκρασία 50°C και τα αφήσαμε για 14 ώρες να ξηραθούν. Αφήσαμε εσκεμμένα ελάχιστα ανοιχτή την πόρτα του φούρνου ώστε να φεύγει η υγρασία και μην εγκλωβίζεται, ώστε να στεγνώσει το ξύλο. Εδώ να σημειωθεί ότι αυτός ο τρόπος ξήρανσης για ξύλα και ακόμη περισσότερο για ξύλα που προορίζονται για κατασκευή μουσικών οργάνων δεν εν δεικνύεται. Το ξύλο πρέπει να στεγνώνει με φυσικό τρόπο. Αυτό όμως απαιτεί αναμονή για μεγάλο χρονικό διάστημα, κάτι που δεν μπορούσε να γίνει.

Κεφάλαιο 5ο

5. Πραγματοποίηση των πειραμάτων

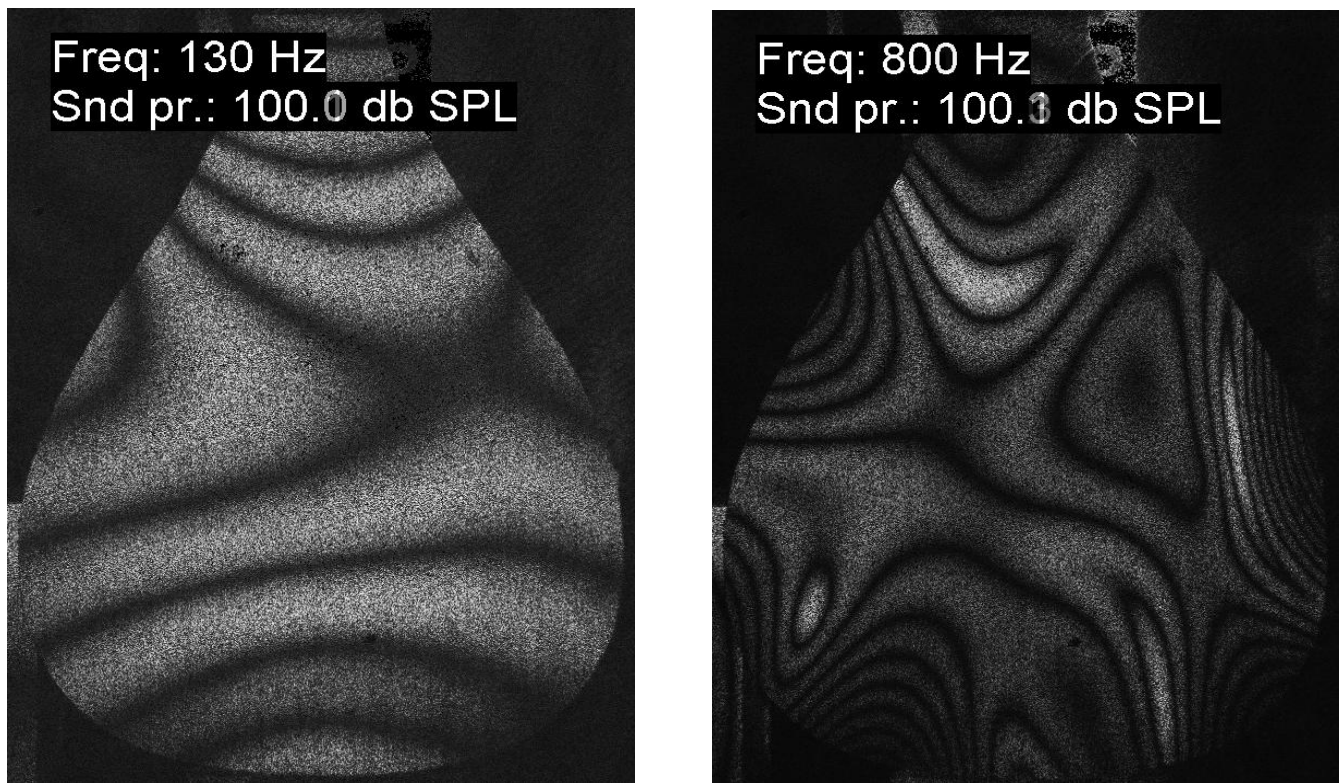
Για τον προσδιορισμό των ιδιομορφών των καπακιών χρησιμοποιήθηκε η οπτική τεχνική της ηλεκτρονικής συμβολομετρίας ψηφίδων (Electronic Speckle Pattern Interferometry – ESPI) και η ηχοβόλιση-ηχογράφιση με πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο στο καπάκι οι οποίες αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων όπου:

α) Στο πρώτο μέρος πραγματοποιούνται μετρήσεις των καπακιών 1 και 2 με τη μέθοδο ESPI και με ηχοβόλιση-ηχογράφιση με πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο στο καπάκι.

β) Στο δεύτερο μέρος ακολουθούν εκ νέου μετρήσεις, μετά το πέρας της χημικής επεξεργασίας των καπακιών 1 και 2 με τη μέθοδο ESPI και με ηχοβόλιση-ηχογράφιση με πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο στο καπάκι ώστε να διαπιστωθούν τυχόν μεταβολές.

5.1 Μετρήσεις με τη μέθοδο ESPI

Με ένα μόνιτορ ηχείο γίνεται ηχοβόλιση με ημιτονικά σήματα στο καπάκι 1 με βήμα περίπου 5 Hz. Η οδήγηση γίνεται με γεννήτρια συχνοτήτων. Το εύρος μελέτης είναι 50 έως 1500 Hz και η στάθμη της έντασης διατηρείται όσο το δυνατό σταθερή. Έγιναν δοκιμές στα 90 και 95 dB αλλά προτιμήθηκε στάθμη 100 dB καθώς είχαμε ευκρινέστερη απεικόνιση της απόκρισης του καπακιού. Καταγράφονται οι κανονικοί τρόποι ταλάντωσης του καπακιού και ταυτόχρονα παρατηρούνται οι περιοχές με μηδενικό πλάτος και το εύρος των συντονισμών.



Εικόνα 5.1: Απεικόνιση κανονικών τρόπων ταλάντωσης με τη μέθοδο ESPI.

Η παραπάνω διαδικασία μπορούσε να πραγματοποιηθεί μόνο χειροκίνητα, μεταβάλλοντας κάθε φορά το ποτενσιόμετρο της γεννήτριας συχνοτήτων κατά 5 Hz. Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε και για τα δύο καπάκια. Επιπροσθέτως, έγινε και καταγραφή των ιδιοσυχνοτήτων του καπακιού με βήμα 1 Hz (sweep tone) για στάθμες 90, 95 και 100 dB και για τα δύο καπάκια.

Σαν πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου μπορεί να θεωρηθεί το γεγονός ότι δεν προστίθεται κάποιο βάρος πάνω στο καπάκι, οπότε οι δεν υπάρχει αλλοίωση στους τρόπους ταλάντωσης του. Ένα μειονέκτημα της μεθόδου θεωρείται η συμμετοχή των ανακλάσεων του χώρου στις μετρήσεις.

Βέβαια αν λάβουμε υπόψιν τις διαστάσεις του χώρου σε σχέση με αυτές του καπακιού, μάλλον η συνεισφορά του χώρου στην απόκριση του καπακιού μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

5.2 Ηχοβόλιση-ηχογράφιση με πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο

Με ένα μόνιτορ ηχείο γίνεται ηχοβόλιση με ημιτονικά σήματα στο καπάκι 1 με βήμα 1Hz (sweep tone). Η οδήγηση γίνεται με γεννήτρια συχνοτήτων. Το εύρος μελέτης είναι από 40 έως 2500 Hz και η στάθμη της έντασης διατηρείται όσο το δυνατό σταθερή στα 100 dB. Η μετάβαση από τα 40 στα 2500 Hz γίνεται σε διάστημα 120 sec.



Εικόνα 5.2: Οι θέσεις που τοποθετήθηκε ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος κατά την ηχογράφιση.

Για να καταγραφούν οι δονήσεις στα διάφορα σημεία, τοποθετείται πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος. Ο κρύσταλλος τοποθετείται σε τρία σημεία διαδοχικά: α) στο κάτω αριστερό, β) στο κάτω δεξί και γ) στο πάνω μέρος του καπακιού, όπως φαίνονται στην παρακάτω εικόνα. Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε και για τα δύο καπάκια. Η καταγραφή έγινε από το Zoom H4n ως κάρτα ήχου. Στη συνέχεια, τα αποθηκευμένα αρχεία επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα Room Eq Wizard που υπάρχει εγκατεστημένο στον ηλεκτρονικό υπολογιστή του εργαστηρίου.

Ένα πλεονέκτημα που έχει αυτή η πειραματική διαδικασία είναι η μη συμμετοχή των ανακλάσεων του χώρου μέσα στον οποίο εφαρμόζεται η μέθοδος στις πειραματικές μετρήσεις. Σαν μειονέκτημα όμως που έρχεται και αντισταθμίζει το παραπάνω είναι το βάρος του κρυστάλλου. Επειδή το βάρος του κρυστάλλου είναι συγκρίσιμο με αυτό του καπακιού ενδέχεται να διαστρεβλώνει τα αποτελέσματα, μεταβάλλοντας τις ιδιοσυχνότητες του καπακιού.

Κεφάλαιο 6ο

6. Αποτελέσματα των πειραμάτων και ανάλυση

Για την παρατήρηση των δονητικών χαρακτηριστικών των καπακιών χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Σε αυτό το κεφάλαιο παραθέτονται τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις των καπακιών 1 και 2 πριν και μετά την χημική επεξεργασία, καθώς και ο σχολιασμός τους.

6.1 ESPI με διέγερση του καπακιού από ηχείο

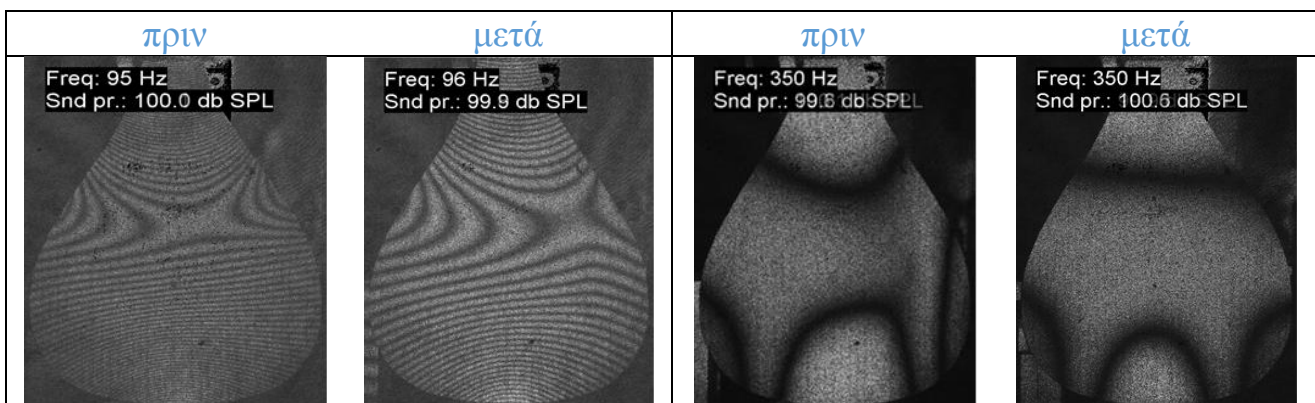
6.1.1 Καπάκι 1

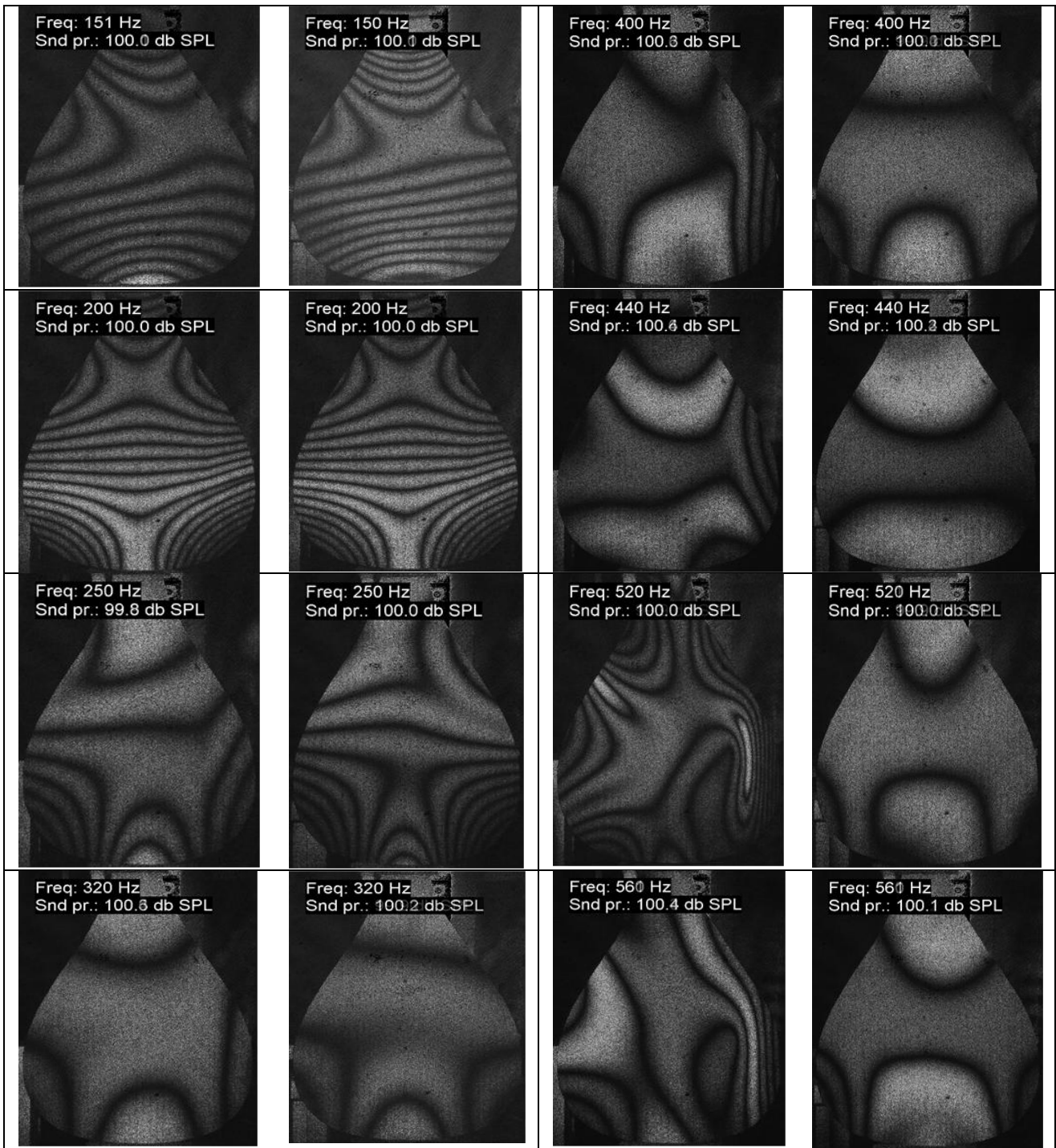
Τα αποτελέσματα που πήραμε, ακολουθώντας τη μεθοδολογία της ESPI για το καπάκι 1 παραθέτονται στη συνέχεια σε μία σειρά από πίνακες που εμπεριέχουν φωτογραφίες από την απεικόνιση των κανονικών τρόπων ταλάντωσης του καπακιού 1. Οι συχνότητες που επιλέχθηκαν είναι αυτές στις οποίες έχουμε πολύ εμφανείς ιδιορυθμούς. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η άμεση οπτική αντίληψη της μεταβολής που επιτελέστηκε και η οποία είναι ιδιαίτερος εμφανής από τα 320 Hz και μετά. Πιο αναλυτικά, από τα 50- 250 Hz παρατηρούμε ότι υπάρχει κάποια διαφορά αλλά όχι αξιόλογη. Στη συνέχεια, από τα 320 Hz, εμφανίζεται μια γραμμή κάθετη στη δεξιά πλευρά του καπακιού, που μοιάζει με ράγισμα. Αυτή η γραμμή παρατηρούμε ότι παύει να υπάρχει μετά την εμβάπτιση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα έχουμε στα 400 Hz. Όμοια γραμμή παρατηρείται και στο καπάκι 2 και ομοίως εξαλείφεται αλλάζοντας το σχηματισμό των ιδιορυθμών.

Είναι πραγματικά εντυπωσιακό το πώς έχει βελτιωθεί η χωρική κατανομή των ιδιορυθμών. Συγκεκριμένα και αρχής γενομένης από τα 520 Hz όπου είναι ιδιαίτερα εμφανές, βλέπουμε μια εντελώς διαφορετική κατανομή των ιδιορυθμών, πολύ πιο ομοιογενή. Στη συνέχεια, παρατηρώντας το τι συμβαίνει και σε άλλες συχνότητες, κυρίως μεταξύ 600 και 850 Hz, τα αποτελέσματα που παίρνουμε είναι εξαιρετικά. Φαίνεται ότι καταφέραμε να επέμβουμε και να αλλάξουμε την κυτταρική δομή του ξύλου αλλάζοντας τη χημική του σύσταση. Δηλαδή, καταφέραμε να εισχωρήσει το βορικό άλας μέσα στα κύτταρα του ξύλου και να αλλάξει τη χημική του σύσταση. Σε τυχόν επανάληψη του πειράματος στο μέλλον, θα μπορούσε να μετρηθεί η μάζα του καπακιού πριν και μετά τη χημική επεξεργασία για να υπάρχει μια ένδειξη της ποσοστιαίας μεταβολής του, άρα και της πυκνότητάς του.

Σαν γενικότερη άποψη, παρατηρείται ότι τα σχήματα της απεικόνισης των ιδιορυθμών πάνω στο καπάκι είναι πολύ πιο ομοιόμορφα και συμμετρικά μετά τη χημική επεξεργασία. Αυτή η ομοιομορφία παραμένει σχεδόν σε όλο το συχνοτικό εύρος των μετρήσεων.

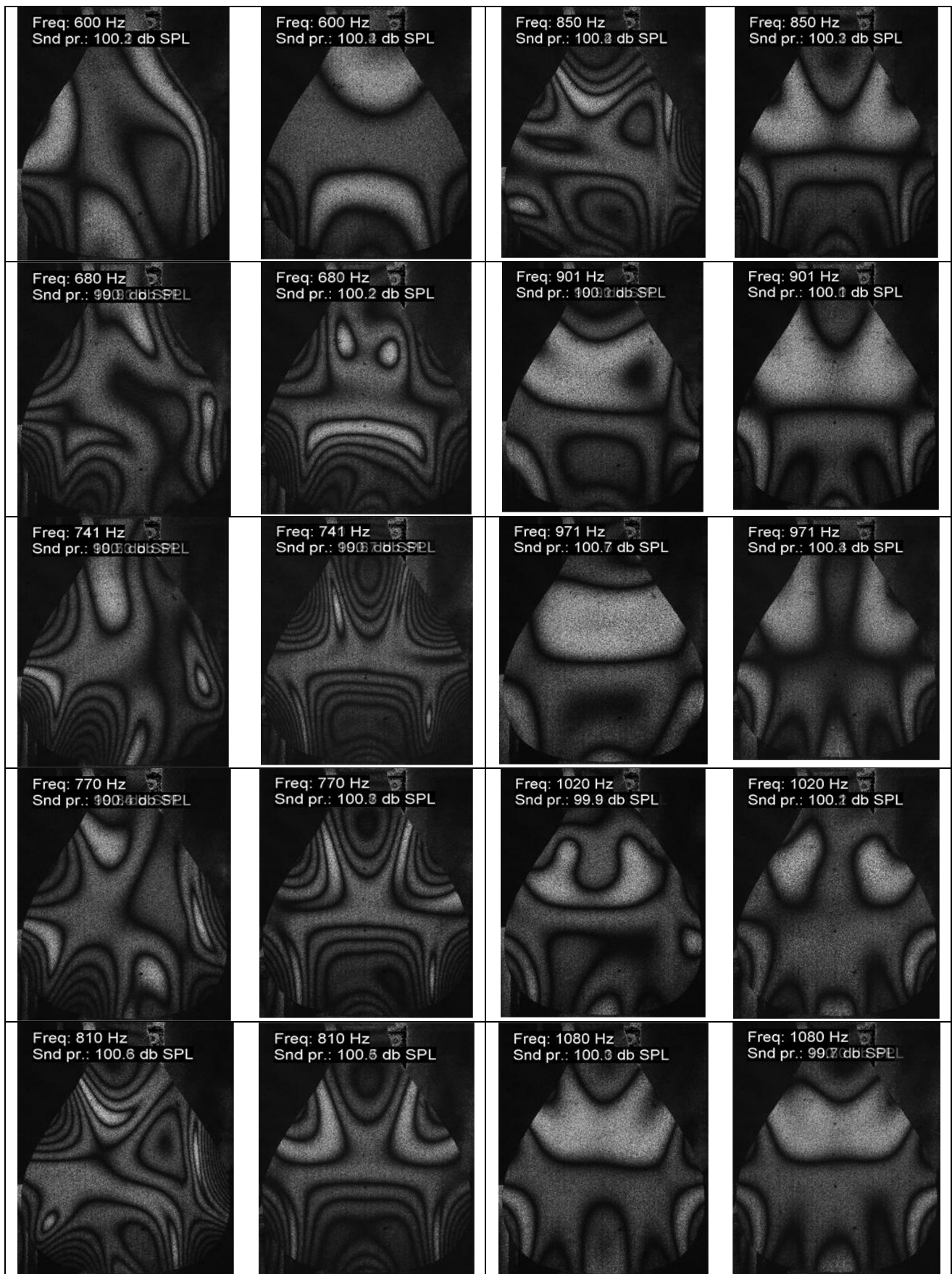
Στην 1η και την 3η στήλη των πινάκων 6.1,6.2 και 6.3 που ακολουθούν, βλέπουμε την απεικόνιση της απόκρισης του καπακιού πριν και στη 2η και την 4η στήλη μετά από τη χημική επεξεργασία. Σε κάθε εικόνα, εκτός από τους ιδιορυθμούς, αναγράφεται η εκάστοτε συχνότητα μετρημένη σε Hz και το επίπεδο της στάθμης του ήχου σε dB SPL.





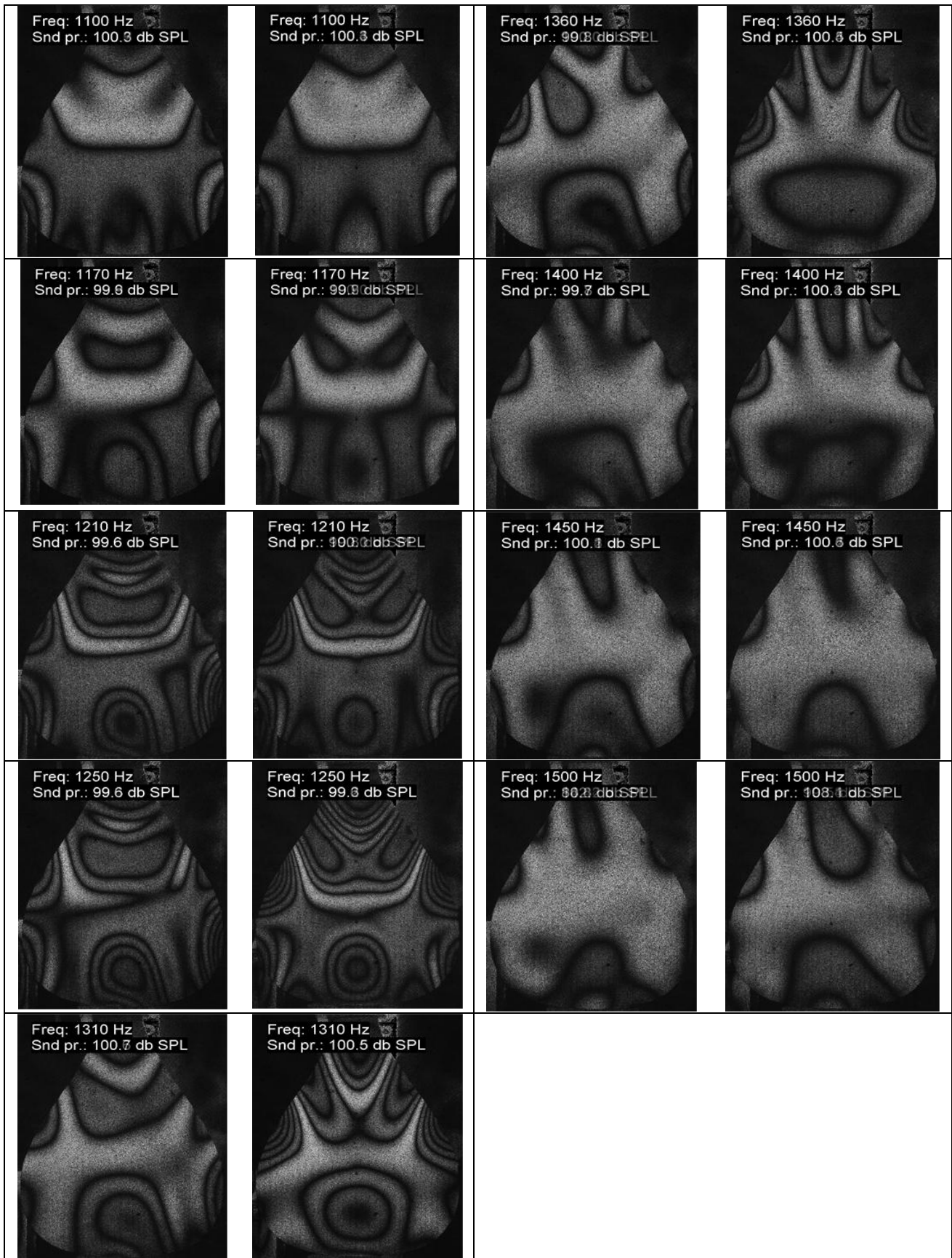
Πίνακας 6.1: Απεικόνιση του ιδιορυθμών του καπακιού 1 πριν και μετά τη χημική επεξεργασία (95-560 Hz).

πριν	μετά	πριν	μετά
------	------	------	------



Πίνακας 6.2: Απεικόνιση του ιδιορυθμών του καπακιού 1 πριν και μετά τη χημική επεξεργασία (600-1080 Hz).

πριν	μετά	πριν	μετά
------	------	------	------



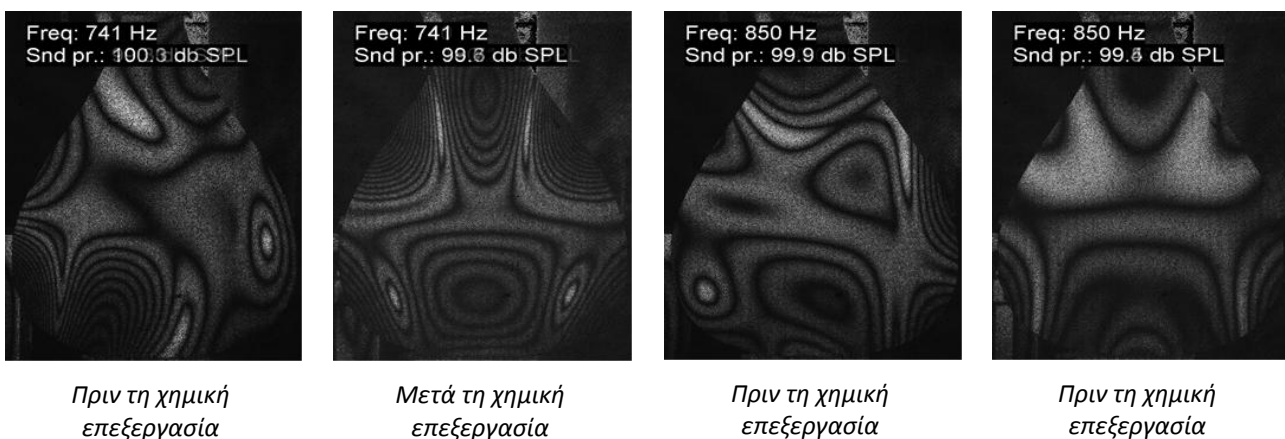
Πίνακας 6.3: Απεικόνιση του ιδιορυθμών του κακακιού 1 πριν και μετά τη χημική επεξεργασία (1100-1500 Hz).

6.1.2 Καπάκι 2

Αυτά που περιγράψαμε για το καπάκι 1, ισχύουν λίγο-πολύ και για το καπάκι 2, για το οποίο ακολουθήσαμε μια ελαφρώς τροποποιημένη μέθοδο, βράζοντάς το για λίγο πριν το στεγνώσουμε. Επιλέξαμε να ακολουθήσουμε μια πιο βίαιη τακτική καθώς ανεβάζοντας τη θερμοκρασία του διαλύματος, αυξάνεται και η διαλυτότητα του βορικού άλατος σε αυτό. Το τελευταίο έχει σαν αποτέλεσμα να αυξάνονται και οι πιθανότητες εισχώρησης βόρακα μέσα στο ξύλο. Ο Ανωγειανάκης [17] άλλωστε, αναφέρει ότι το βράσιμο των ξύλων μέσα σε αλατόνερο είναι μια τεχνική που ακολουθούσαν και οι παλαιότεροι κατασκευαστές οργάνων και αυτό που κατάφεραν ήταν να επέμβουν στην κυτταρική δομή του ξύλου. Αποτελεί βέβαια και μια τεχνική που θα μπορούσε πολύ εύκολα να υλοποιηθεί την εποχή των Stradivari και Guarneri καθώς η πρόσβαση σε νερό και αλάτι ήταν και τότε αρκετά εύκολη.

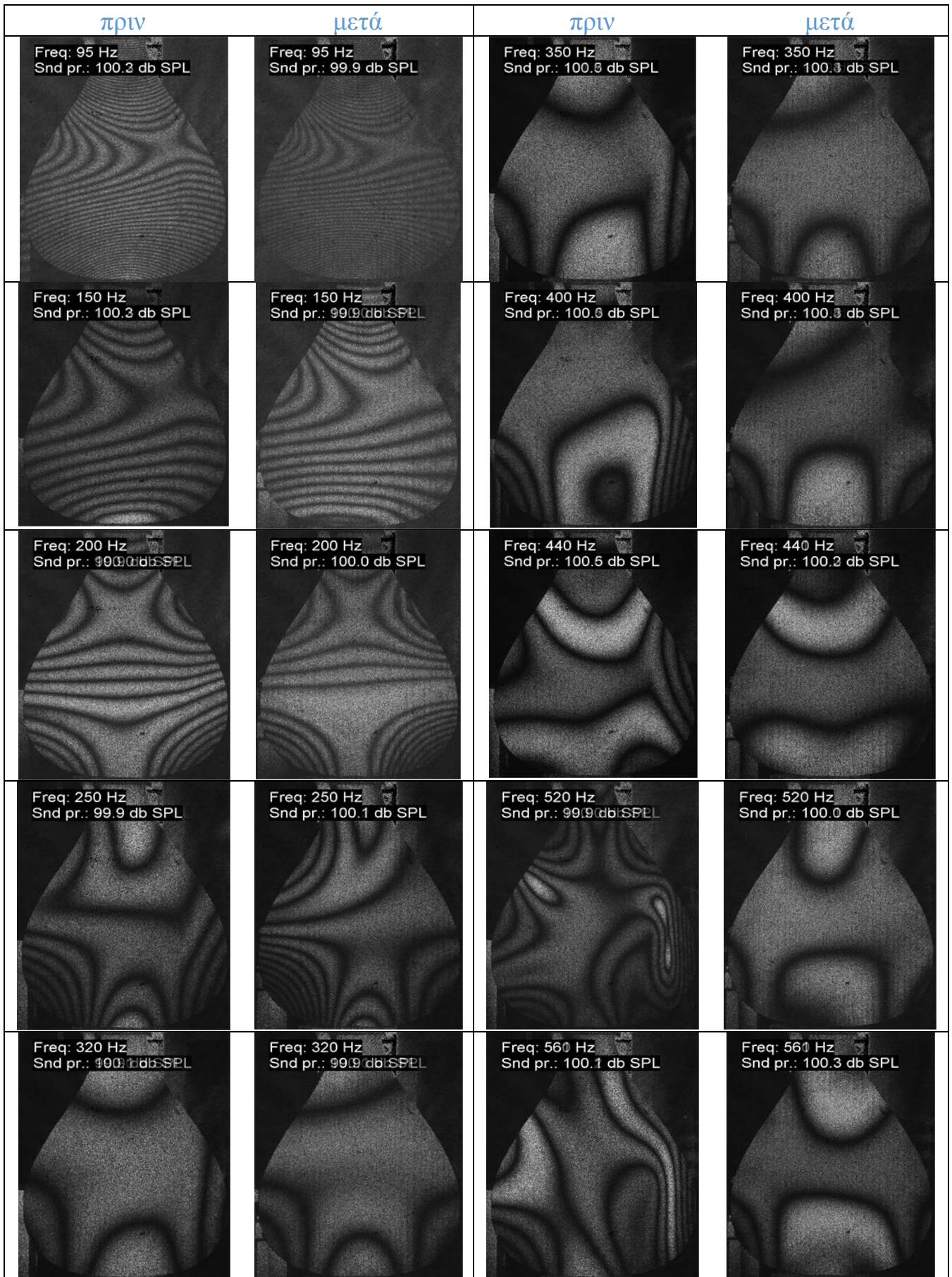
Τα αποτελέσματα παραθέτονται στη συνέχεια μέσω των αντίστοιχων φωτογραφιών για την απόκριση του καπακιού 2 μετά την εμφύσηση σε διάλυμα βορικού άλατος. Θα μπορούσαμε και πάλι να σχολιάσουμε ότι μετά την εμφύσηση, οι σχηματισμοί είναι πιο συμμετρικοί και σίγουρα πολύ πιο ομοιόμοφοι. Τα αποτελέσματα είναι και πάλι εντυπωσιακά και γίνονται εμφανή σε όλο το φάσμα των μετρήσεων.

Πιο αναλυτικά, παρατηρούμε ότι ουσιαστική διαφοροποίηση υπάρχει και πάλι μετά τα 320 Hz, οπότε και εμφανίζεται το ράγισμα που αναφέραμε όπως και προηγουμένως στη δεξιά πλευρά του καπακιού. Το ράγισμα, μετά τη χημική επεξεργασία και πάλι εξαφανίζεται. Χαρακτηριστική εικόνα για αυτό το φαινόμενο έχουμε και πάλι στα 400 Hz. Πολύ μεγάλη μεταβολή έχουμε στα 741, 810 και 850 Hz. Αυτή η μεταβολή βέβαια, γίνεται αντιληπτή και σε άλλες συχνότητες. Ακόμα, παρατηρείται μεγάλη ομοιότητα στα 1080 και 1100 Hz, αυτό φαίνεται και στα δύο καπάκια.

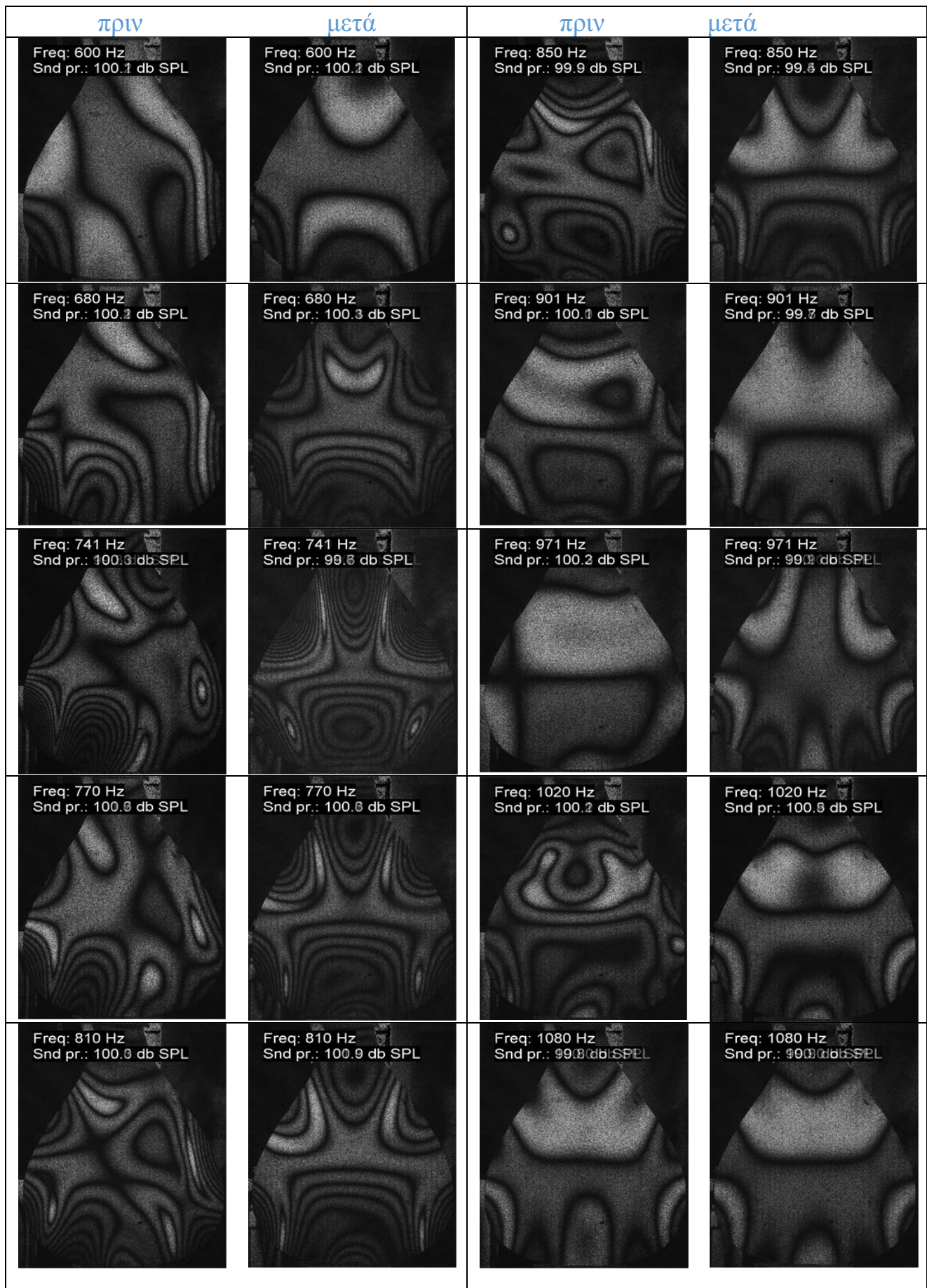


Εικόνα 6.1: Απεικόνιση των ιδιορυθμών του καπακιού 2 στις συχνότητες των 741 και 850 Hz. Οι σχηματισμοί είναι ιδιαίτερα συμμετρικοί και ομοιόμοφοι μετά την χημική επεξεργασία.

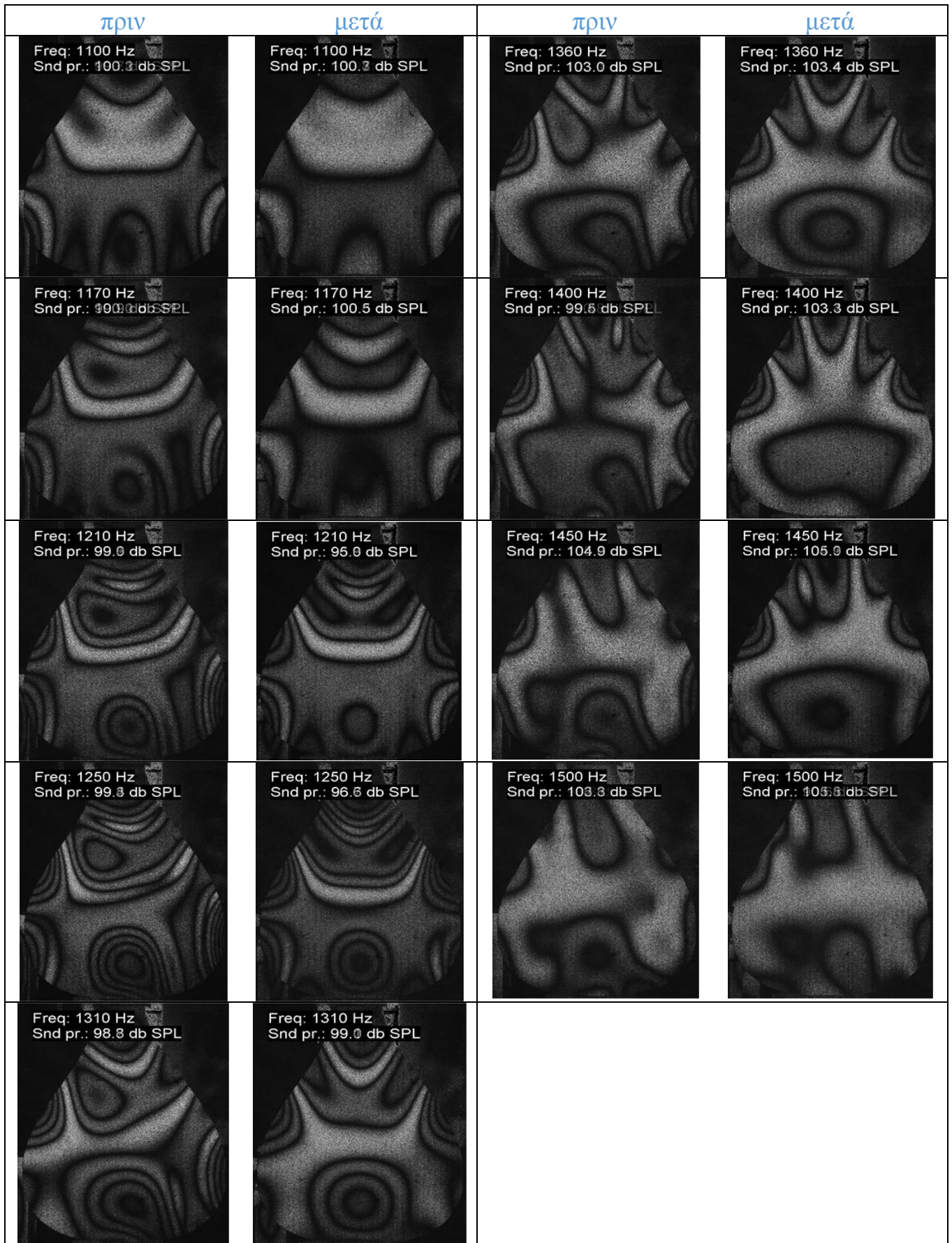
Επεξηγώντας τους πίνακες που ακολουθούν, στην 1η και την 3η στήλη των πινάκων 6.4, 6.5 και 6.6 βλέπουμε την απεικόνιση της απόκρισης του καπακιού πριν και στη 2η και την 4η στήλη μετά από τη χημική επεξεργασία. Σε κάθε εικόνα, εκτός από τους ιδιορυθμούς, αναγράφεται η εκάστοτε συχνότητα μετρημένη σε Hz και το επίπεδο της στάθμης του ήχου σε dB SPL.



Πίνακας 6.4: Απεικόνιση του ιδιορυθμών του καπακιού 2 πριν και μετά τη χημική επεξεργασία (95-560 Hz).



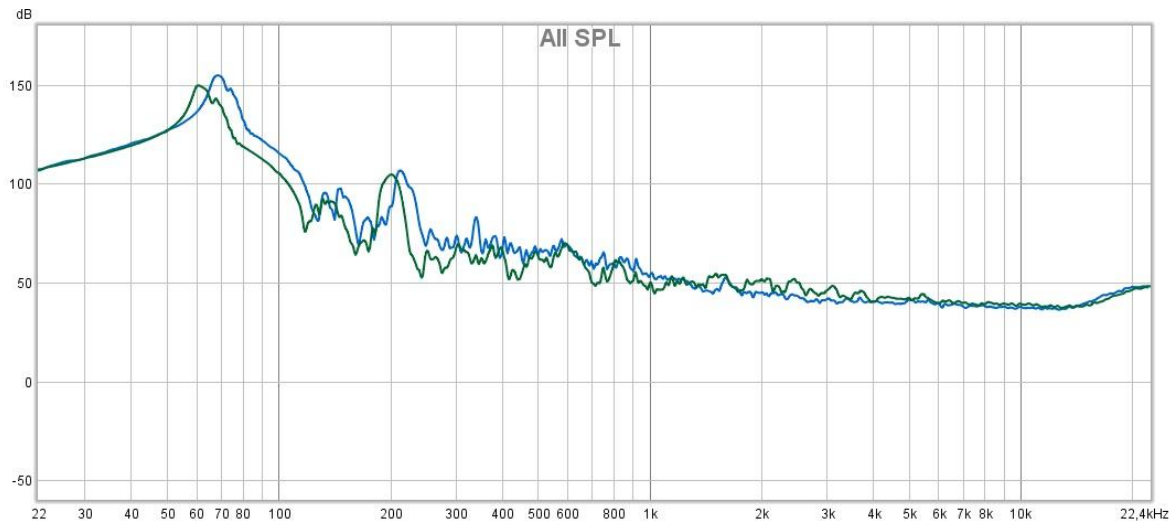
Πίνακας 6.5: Απεικόνιση του ιδιορυθμών του καπακιού 2 πριν και μετά τη χημική επεξεργασία (600-1080 Hz).



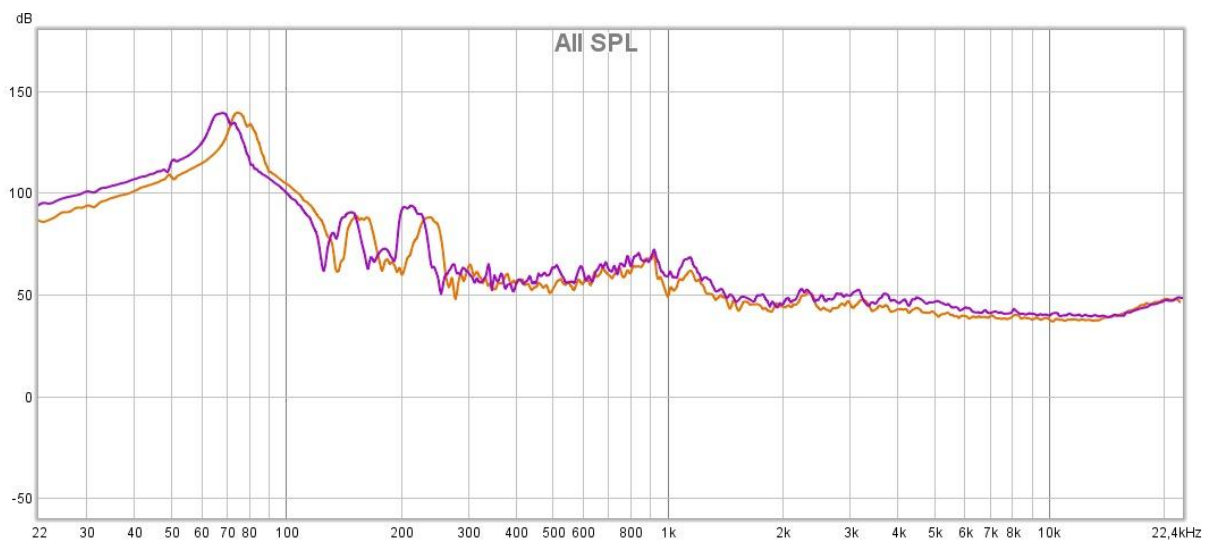
Πίνακας 6.6: Απεικόνιση του ιδιορυθμών του καπακιού 2 πριν και μετά τη χημική επεξεργασία (1100-1500 Hz).

6.2 Ανάλυση ηχογραφημένου υλικού

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παραθέτονται τα αποτελέσματα από τη μέθοδο ανάλυσης ηχογραφημένου υλικού, για τη μέτρηση της απόκρισης ενός καπακιού. Στα παρακάτω 3 γραφήματα φαίνεται η απόκριση του καπακιού 1 πριν και μετά την εμβάπτιση, για κάθε διαφορετικό σημείο που τοποθετήσαμε τον κρύσταλλο. Στο τελευταίο γράφημα έχουμε όλα τα γραφήματα, για όλα τα σημεία που τοποθετήθηκε ο κρύσταλλος, πριν και μετά την εμβάπτιση.



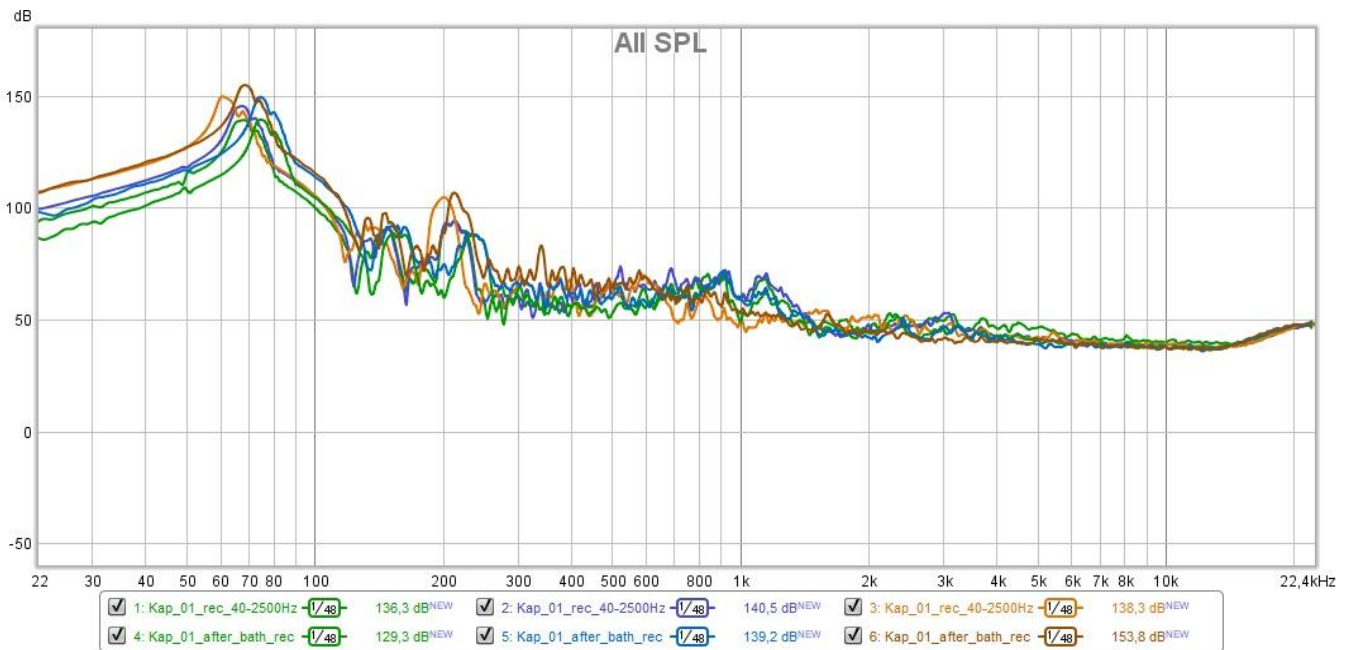
Γράφημα 6.1: Συχνотική απόκριση καπακιού 1, θέση κρυστάλλου πάνω-κέντρο. Πράσινο χρώμα πριν και μπλε μετά την εμβάπτιση.



Γράφημα 6.2: Συχνотική απόκριση καπακιού 1, θέση κρυστάλλου κάτω-αριστερά. Μοβ χρώμα πριν και κίτρινο μετά την εμβάπτιση.



Γράφημα 6.3: Συχνотική απόκριση καπακιού 1, θέση κρυστάλλου κάτω δεξιά. Κόκκινο χρώμα πριν και πράσινο μετά την εμβάπτιση.



Γράφημα 6.4: Συχνотική απόκριση καπάκι 1 για όλες τις θέσεις του κρυστάλλου, πριν και μετά την εμβάπτιση. Τα χρώματα επεξηγούνται στο υπόμνημα της εικόνας.

Σαν γενικό σχόλιο, θα μπορούσαμε να πούμε ότι βλέπουμε μετά την εμβάπτιση σε βορικό άλας, μια συνολική μετατόπιση των συντονισμών προς τα δεξιά του άξονα των συχνοτήτων. Αυτό ισχύει και για τα τρία σημεία που τοποθετήσαμε τον κρύσταλλο. Εφόσον λοιπόν έχει συμβεί και στις τρεις περιπτώσεις, θεωρούμε ότι δεν είναι τυχαίο. Γραφήματα για το καπάκι 2 δεν συμπεριλάβαμε γιατί έβγαιναν έξω από το όριο σφάλματος.

Κεφάλαιο 7ο

7. Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

Ολοκληρώνοντας το παρόν πόνημα, θα πρέπει να κάνουμε μια αναφορά στα πεπραγμένα έως τώρα. Έμπνευση για την παρούσα πτυχιακή εργασία αποτέλεσε η έρευνα των Joseph Nagyvary, Renald N. Guillemette και Clifford H. Spiegelman που στόχο είχε να εντοπιστούν υπολείμματα ορυκτών σε δείγματα από ξύλο που προερχόταν από ένα βιολί και ένα βιολοντσέλο του Stradivari, σε δύο βιολιά του Guarneri, μια βιόλα του H. Jay κι ένα βιολί του Gand-Bernardel. Η έρευνα αυτή που δημοσιεύτηκε το 2009, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα ξύλα που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των οργάνων των Stradivari και Guarneri είχαν υποστεί χημική επεξεργασία από χημικές ουσίες μεταξύ των οποίων και το βορικό άλας.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας ήταν η πραγματοποίηση πειραμάτων για να διαπιστωθεί κατά πόσο η χημική επεξεργασία καπακιών με βορικό άλας είναι δυνατόν να οδηγήσει σε μεταβολή της σύστασης του ξύλου και ακολούθως των ακουστικών του χαρακτηριστικών.

Για τις ανάγκες των πειραμάτων, κατασκευάστηκαν δύο όμοια καπάκια στα οποία έγινε εμφάνιση σε διάλυμα βορικού άλατος. Στα καπάκια αυτά πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις όσον αφορά την απόκριση τους, προτού και αφότου υποβληθούν σε χημική επεξεργασία. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Οπτικής Ακουστικής του ΤΕΙ Ρεθύμνου, με δύο διαφορετικές μεθόδους. Οι μέθοδοι αυτές, οι οποίες αναλύθηκαν σε προηγούμενες ενότητες, είναι η ηλεκτρονική συμβολομετρία ψηφίδων (Electronic Speckle Pattern Interferometry) και η ανάλυση ηχογραφημένου υλικού από ηχοβολισμό. Ακόμα, ακολουθήθηκε διαφοροποιημένη διαδικασία εμφάνισης του δεύτερου καπακιού για να υπάρχει μέτρο σύγκρισης και μεγαλύτερη πιθανότητα επιτυχίας του πειράματος. Έτσι, πραγματοποιήθηκε βρασμός σε διάλυμα βορικού άλατος για το δεύτερο καπάκι.

Ξεκινώντας από τη δεύτερη μέθοδο που επιλέξαμε για τη διεξαγωγή των μετρήσεων, θα λέγαμε ότι δεν μας οδήγησε σε κάποιο ιδιαίτερο συμπέρασμα. Παρατηρήσαμε μόνο μια γενική μετατόπιση των συντονισμών προς τα δεξιά του άξονα των συχνοτήτων. Αυτό βέβαια, το οποίο διαπιστώνουμε ότι ισχύει πάντα, ίσως να βοηθούσε στο κούρδισμα του καπακιού. Για παράδειγμα, θα μπορούσαν να γίνουν περισσότερα πειράματα για να βεβαιωθούμε αν η μετατόπιση των συντονισμών είναι σταθερή και αν όντως είναι, να χρησιμοποιείται η εμφάνιση για μικροκούρδισμα του καπακιού. Μια μεταβολή της τάξης των 10 Hz, ίσως θα μπορούσε να παίξει σημαντικό ρόλο σε πολύ εξεζητημένες περιπτώσεις κατασκευής εγχόρδων οργάνων. Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν το γεγονός της συχνοτικής μετατόπισης, καθώς προσθέτει μια επιπλέον παράμετρο στη χημική επεξεργασία καπακιών.

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να αναρωτηθούμε για την καταλληλότητα της μεθόδου ανάλυσης ηχογραφημένου υλικού για το συγκεκριμένο πείραμα. Είναι λογικό, μια μεταβολή στη δομή του ξύλου, να επιφέρει μεταβολές στους τρόπους δόνησης του καπακιού. Αυτές οι μεταβολές όμως, δεν είναι δυνατόν να εντοπιστούν και να επισημανθούν από μία μη ολογραφική μέθοδο. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν έγιναν ορατά τα αποτελέσματα της χημικής επεξεργασίας μέσω της ανάλυσης ηχογραφημένου υλικού.

Μελετώντας τώρα, τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου ESPI είναι πολύ εύκολο κάποιος να συμπεράνει ότι υπάρχει ορατή επίδραση από τη χημική επεξεργασία στο ξύλο. Αυτή μάλιστα, είναι ιδιαίτερος εμφανής για το μεγαλύτερο συχνοτικό εύρος που πραγματοποιήσαμε το πείραμα. Το γεγονός ότι πετύχαμε το ίδιο αποτέλεσμα και για τα δύο καπάκια, έρχεται σαν επιβεβαίωση της ορθότητας της μεθόδου. Εδώ, να επισημάνουμε ότι η μέθοδος της απλής εμφάνισης, χωρίς βρασμό, φαίνεται να λειτουργεί καλύτερα. Αυτό, δεδομένου ότι η απόκριση του καπακιού 1 είναι κάπως πιο ομοιόμορφη. Για να το τεκμηριώσουμε όμως αυτό χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση και επανάληψη των πειραμάτων, καθώς δεν είναι εύκολο να ποσοτικοποιηθεί με τα έως τώρα δεδομένα.

Μπορούμε λοιπόν να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι μέσω της χημικής επεξεργασίας σε διάλυμα βορικού άλατος επιτυγχάνεται η μεταβολή της δομής ενός καπακιού. Εκείνο όμως που δεν έχει απαντηθεί είναι το πώς αυτή η μεταβολή επηρεάζει ποιοτικά τα ακουστικά χαρακτηριστικά ενός καπακιού. Δηλαδή, δεν ξέρουμε πως ακούγεται και αν έχει βελτιωθεί ο παραγόμενος ήχος. Για να εντοπίσουμε όμως αν υπάρχει βελτίωση του ήχου ενός οργάνου, θα πρέπει πρώτα να οριστεί το τι θεωρείται “καλός” ήχος και ποια συγκεκριμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά θα πρέπει αυτός να έχει. Εφόσον οριστούν αυτά, μπορούμε να συνεχίσουμε το πείραμα και να διαπιστώσουμε τη

συμβολή ή μη της χημικής επεξεργασίας με βορικό άλας στη βελτίωση των ακουστικών χαρακτηριστικών ενός καπακιού και κατ' επέκταση ενός οργάνου. Για να βεβαιωθούμε όμως για την ορθή της χρήση, θα πρέπει να συνεχίσουμε τον πειραματισμό και τη μελέτη.

Κλείνοντας, συμπεραίνεται ότι η χημική επεξεργασία με διάλυμα βορικού άλατος φαίνεται μια πολλά υποσχόμενη τεχνική που μπορεί να συνδράμει στην κατασκευή έγχορδων μουσικών οργάνων με βελτιωμένα ακουστικά χαρακτηριστικά.

Αναφορές

1. Nagyvary J, DiVerdi JA, Owen NL, Tolley HD (2006) Wood used by Stradivari and Guarneri. *Nature* 444: 565.
2. Nagyvary J, Guillemette RN, Spiegelman CH (2009) Mineral Preservatives in the Wood of Stradivari and Guarneri. *PLoS ONE* 4(1): e4245. doi:10.1371/journal.pone.0004245 pg 3
3. Schelleng JC (1982) Wood for violins. *CAS Newsletter* 37: 8–19.
4. Haines D (1980) On musical instrument wood Part II. Surface finishes, plywood, light and water exposure. *CAS Newsletter* 33: 19–23.
5. McIntyre ME, Woodhouse J (1988) On measuring the elasticity and damping constants of orthotropic sheet materials. *Acta Metallurgica* 36: 1397–1416.
6. Burckle L, Grissino-Mayer HD (2003) Stradivaris, violins, tree rings and the Maunder Minimum: a hypothesis. *Dendrochronologia* 21: 41–45.

7. Tiepolo MF (1987) Boschi della Serenissima, exhibit of the State Archives of Venice
8. Gug R (1988) Salted soundboards&sweet sound. Fellowship of Makers & Restorers of Historical Instruments. C881, Q52.
9. Sacco ni SF (1972) I “Segreti” di Stradivari Publ. Cremona, Libreria del Convegno.
10. Nagyvary J (1984) The Cremona gold color: its chemistry and reconstruction. J Violin Soc America VII(2): 89–110.
11. Barlow CY, et al. (1988) Wood treatment used in Cremonese instruments. Nature 332: 313.
12. Nagyvary J (1988) The chemistry of a Stradivarius. Chemical&Engineering News 66(21): 24–31.
13. www.nagyvaryviolins.com.
14. Nagyvary J (1978) History and interpretation of chemical knowledge available to violin makers. J Violin Soc Amer IV(3&4): 147–176.
15. Nagyvary J (1981) Effect of minerals and fibers on plate tuning. J Violin Soc Amer VI(2): 53–79.
16. Bucur V (2006) Acoustics of Wood. New York: CRC Press.
17. Φοίβος Ανωγειανάκης (1976) Ελληνικά λαϊκά μουσικά όργανα: 231.
18. <https://el.wikipedia.org/wiki/Μπουζούκι>, 16/4/2019.
19. Κώστας Χαλιός (2006) <https://www.klika.gr/index.php/peri-mousikis/organopoiia/176-ataskevi-bouzouki.html>
20. D. Gabor, A new microscopic principle, Nature, 161, 777 (1948).
21. Hariharan P. , Optical Holography, second edition, Cambridge University Press, (1996).
22. R. Jones and C. Wykes, Holographic and speckle interferometry, Cambridge University Press, Cambridge (1989). R. Jones and C. Wykes, Holographic and speckle interferometry, Cambridge University Press, Cambridge (1989).
23. Baker LR (1983) Holographic and speckle interferometry. Optica Acta Int J Opt 30:1041
24. J.A. Leendertz, Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect, J. Phys. E: Scientific Instruments 3, pp. 214 – 218 (1970).
25. J.N. Butters and J.A. Leendertz, Holographic and video techniques applied to engineering measurement, J. Meas. Control 4, pp. 349 – 354 (1971).
26. P. Meinlschmidt, K.D. Hinsch and R.S. Sirohi (Eds.), Selected papers on electronic speckle pattern interferometry, SPIE MS132, SPIE, Bellingham (1996).
27. Lokberg O (1985) ESPI- the ultimate holographic tool for vibration analysis? J Acoust Soc Am 75: 1783-1791.
28. Σ. Γυμνόπουλος, Σ. Κουζούπης, Μ. Μπακαρέζος, Γ. Ορφανός, Μ. Ταταράκης, Ν.Α. Παπαδογιάννης, “Μελέτη δονήσεων καπακίων Ελληνικών παραδοσιακών εγχόρδων μουσικών

οργάνων: προκαταρκτικά αποτελέσματα με χρήση μηχανικών και οπτικών τεχνικών”, Ακουστική 2004, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα, 27-28 Σεπτεμβρίου 2004, Πρακτικά σσ. 93-100, Εκδ.: Γ. Μπαμνιος, 2004

29. M. Bakarezos, S. Gymnopoulos, S. Brezas, Y. Orfanos, E. Maravelakis, C.I. Papadopoulos, M. Tatarakis, A. Antoniadis and N.A. Papadogiannis, “Vibration analysis of the top plates of traditional Greek string musical instruments”, 13th International Congress of Acoustics and Vibration (ICSV13), Vienna, Austria, 2-6 July 2006, CD-ROM Proceedings, Eds.: J. Eberhardsteiner, H.A. Mang and H. Waubke, 2006

30. Σ. Γυμνόπουλος, Ε. Μπακαρέζος, Β. Βάθης, Λ. Χαρτοφύλακας, Σ. Μπρέζας, Ι. Ορφανός, Ε. Μαραβελάκης, Χ. Παπαδόπουλος, Μ. Ταταράκης, Α. Αντωνιάδης, Ν.Α. Παπαδογιάννης, “Ακουστική και συμβολομετρική ανάλυση της Κρητικής λύρας”, Ακουστική 2006, Ι.Τ.Ε., Ηράκλειο, Ελλάδα, 18-19 Σεπτεμβρίου 2006, Πρακτικά σσ. 239-246, Εκδ.: Μ. Ταρουδακης & Π. Παπαδακης, 2006

31. Β. Βάθης, Ε. Μπακαρέζος, Ι. Ορφανός, Ν.Α. Παπαδογιάννης, “Ακουστική μελέτη πιστής ανακατασκευής της αρχαίας ελληνικής λύρας χέλυς”, Ακουστική 2008, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, Ελλάδα, 29 Σεπτεμβρίου – 1 Οκτωβρίου 2008, Πρακτικά σσ. 173-181, Εκδ.: Ν. Μπαρκας, 2008

32. Λ. Χαρτοφύλακας, Ε. Μπακαρέζος, Ι. Ορφανός, Ν.Α. Παπαδογιάννης, “Σύνδεση των ακουστικών χαρακτηριστικών της δομής της Κρητικής λύρας με την ποιότητα του εκπεμπόμενου ήχου”, Ακουστική 2008, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, Ελλάδα, 29 Σεπτεμβρίου – 1 Οκτωβρίου 2008, Πρακτικά σσ. 182-191, Εκδ.: Ν. Μπαρκας, 2008

33. Βουλγαρίδης, Η. Ποιότητα και χρήσεις του ξύλου. ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ. Αθήνα, σελ 54-55, (2015).

34. <https://www.woodman.gr/el/thetechnical/whytreatment>, 16/4/2019.

35. http://195.134.76.37/chemicals/chem_H3BO3.htm , 16/4/2019.

Βιβλιογραφία

- Ανωγεινάκης, Φ. (1976). Ελληνικά λαϊκά μουσικά όργανα. Εθνική Τράπεζα της Ελλάδος
- Βουλγαρίδης, Η. (2015). Ποιότητα και χρήσεις του ξύλου. ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ. Αθήνα
- Πατσάς, Κ. (2009). Ανάπτυξη τροποποιημένων τεχνικών ολογραφικής συμβολομετρίας ESPI για την μελέτη κανονικών τρόπων ταλάντωσης επιφανειών. Πτυχιακή εργασία, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ρέθυμνο.

- Σιδηράς, Ι. (2013). Μελέτη δονητικών χαρακτηριστικών παραδοσιακών κρουστών μουσικών οργάνων με τη χρήση οπτικών συμβολομετρικών τεχνικών. Πτυχιακή εργασία, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ρέθυμνο.
- Σκαρλάτος, Δ. (2008). Εφαρμοσμένη ακουστική (Γ΄ έκδοση). Πάτρα: εκδόσεις Gotsis.
- Τζήκας, Β. (2007). Κατασκευή και μελέτη Μαντόλας. Πτυχιακή εργασία, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ρέθυμνο.
- Χαρτοφύλακας, Λ. (2007). Διερεύνηση του ρόλου των δονητικών χαρακτηριστικών του αντηχείου έγχορδων παραδοσιακών μουσικών οργάνων και συγκεκριμένα κρητικής λύρας, στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του φυσικά εκπεμπόμενου ήχου. Πτυχιακή εργασία, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ρέθυμνο.
- Joseph Nagyvary , Renald N. Guillemette , Clifford H. Spiegelman (2009) Mineral Preservatives in the Wood of Stradivari and Guarneri
- Fletcher, N. H., & Rossing, T. D. (1998). The physics of musical instruments (2 nd ed.). Springer science and business media, library of congress cataloging-in-publication data.
- Hall, D. E. (1990). Musical acoustic (2nd ed.). California: Brooks/Cole publishing company grove.
- Hecht, E. (2002). Optics. Addison – Wesley.
- Siegman, A. E. (1996). Lasers. University Science Books.
- Sirohi, R. S., & Chau, F. S. (1999). Optical methods of measurement: Wholefield techniques. New York: Marcel Dekker Inc.